
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

**Aplikace regulačních struktur s referenčním
modelem pro řízení elektrických pohonů**

**Control structures with reference model and
electric drives control**

Bakalářská práce

Autor:	Pavel Kněbort
Vedoucí práce:	Ing. Martin Diblík, Ph.D.
Konzultant:	Ing. David Lindr

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Především děkuji panu Ing. Martinu Diblíkovi, Ph.D., za konzultace při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

Anotace

Hlavním úkolem bakalářské práce je vyzkoušet použití regulační struktury s referenčním modelem na reálném pohonu Siemens Sinamics S120. Byla vybrána regulační struktura s referenčním modelem podle Ljapunova a to především díky vhodnosti této metody pro řízení elektrických pohonů.

Nejprve bylo nutné vytvořit matematické modely motorů. Jsou zde použity dva typy modelů. Stejnosměrný motor s cizím buzením (SMCB), který byl vybrán pro svou jednoduchost a snadný matematický popis. Druhý pohon je synchronní motor s permanentními magnety (SMPM), který je použit na reálném pohonu.

Následující část se soustředí na klasické řízení výše zmíněných pohonů v kaskádní regulační struktuře. Další část se zabývá regulačními strukturami s referenčním modelem zejména pak regulační strukturou s referenčním modelem podle Ljapunovova.

Hlavní část se zabývá aplikací těchto regulačních struktur na reálný pohon řady Siemens Sinamics S120. Jsou zde zmíněny základní způsoby vložení vlastních řídicích struktur. Je zde popsána tvorba těchto struktur.

Práce také porovnává průběhy regulací na reálném pohonu a simulací v programu Matlab. Závěr se věnuje shrnutí dosažených výsledků a možností dalšího pokračování, především rozšířením regulačních struktur pro lepší regulaci reálného pohonu.

Klíčová slova:

Regulační struktury s referenčním modelem, synchronní motor s permanentními magnety, stejnosměrný pohon, DCC editor, Simatic S120, elektrické pohony

Anotation

The main topic of the thesis is to try the application of control structures with a reference model to the real the drive SIEMENS SINAMICS S120. The control structure with a reference model based on the Lyapunov theory was chosen mainly due to the suitability of this method for control of electrical drives.

First, it was necessary to create mathematical models of drives. There are two types of models used. DC motor with separate excitation was chosen for its simplicity and ease of mathematical description. The second drive is a synchronous motor with permanent magnets which is used in real drive.

The following part focuses on traditional control of these drives with the cascade control structure. Next part deals with the control structures with the reference model especially the control structure with a reference model based on Lyapunov theory.

The main part deals with the application of these control structures of the real drive Siemens Sinamics S120 series. The basic ways to insert and use its own control structures are described. The necessary steps to create this structure are also described.

The thesis also compares the control responses of the real drive with simulation in Matlab. The conclusion summarizes the results and the possibility of further sequels, mainly by extending the control structure to better regulate real drive.

Keywords:

Control structures with reference model, synchronous machines with permanent magnets, direct-current drive, DCC editor, Sinamics S120, electric drive

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotace.....	5
Anotation	6
Úvod	12
1. Matematické modely v programu Matlab	13
1.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením	13
1.2 Synchronní motor s permanentními magnety	15
2. Klasické regulační struktury	19
2.1 Regulace stejnosměrného motoru s cizím buzením	19
2.2 Řízení synchronního motoru s permanentními magnety	23
3. Regulační struktura s referenčním modelem	25
3.1 Rozdělení systémů s referenčním modelem.....	25
3.1.1 Parametrické adaptivní systémy	25
3.1.2 Signální adaptivní systémy.....	26
3.2 Řízení pohonů s referenčním modelem pomocí II. Ljapunovovy metody	26
3.2.1 Princip II. Ljapunovovy metody	27
3.2.2 Regulační struktura s referenčním modelem pomocí II. Ljapunovovy metody.....	27
3.2.3 Ljapunovova metoda pro regulaci rychlosti servopohonu	29
4. Implementace vybraných regulačních struktur do průmyslového pohonu...	30

4.1	Pohony Siemens	30
4.2	Systém řízení elektrických pohonů Siemens S120	30
4.2.1	Řídicí jednotka	32
4.3	Simotion Scout	33
4.3.1	Práce ve stavu online	33
4.3.2	Měření v Simotion Scout	34
4.3.3	Archivování a obnova zálohovaných dat	35
4.4	BICO technologie	35
4.5	Editor DCC	36
4.5.1	Vložení nového DCC Chartu	36
4.5.2	Propojování DCB	37
4.5.3	Určení pořadí výpočtů bloků	38
4.5.4	Vytvoření vlastního chartu	38
4.5.5	Nahrání DCC Chartu do pohonu	39
5.	Aplikace vybraných referenčních struktur	40
5.1	Model SMCB	40
5.2	Upravený Ljapunovův regulátor	42
5.3	Regulační struktura s referenčním modelem podle Ljapunova	43
5.4	Měření na reálném pohonu	44
5.5	Omezení reálného pohonu	45
6.	Závěr	49
	Použitá literatura	52

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A		matice dynamiky stavového popisu systému
B		matice vstupů stavového popisu systému
c_{ss}		konstrukční konstanta stejnosměrného motoru
e		vektor odchylek stavových veličin
f		vektor poruch
I		integrační zesílení
i	A	okamžitá hodnota proudu
I_l	A	proud statorovým vinutím SMPM
I_d	A	proud statoru v příčné ose
i_f	A	okamžitá hodnota proudu budícího obvodu SMCB
i_q	A	okamžitá hodnota proudu SMCB
I_q	A	proud statoru v podélné ose
J	kg.m ²	moment setrvačnosti
J		imaginární jednotka
K		konstanta závislá na konstrukci SMCB
K		proporcionální zesílení regulátoru
k		kompensační vektor
L_l	H	celková indukčnost statorového vinutí SMPM
L_d	H	indukčnost statorového vinutí ve směru d-osy
L_f	H	indukčnost budícího vinutí SMCB
L_q	H	indukčnost statorového vinutí SMCB
L_q	H	indukčnost statorového vinutí ve směru q-osy
m	Nm	moment
M	Nm	moment motoru
Mh	Nm	hnací elektromagnetický moment
m_z	Nm	zátěžný moment
M_z	Nm	zátěžný moment
N	ot/min	otáčky
N		počet závitů kotvy SMCB
p		počet pólů elektromotoru

P		proporcionální zesílení
pp		počet pólových dvojic elektromotoru
Q		volitelná matice zesílení odchylek Ljapunovova regulátoru
R	Ω	činný odpor statorového vinutí SMPM
$R(s)$		obrazový přenos regulátoru
s		Laplaceův operátor
T	s	integrační časová konstanta regulátoru
u		vstupní vektor
U_I	V	napájecí napětí statorového vinutí SMPM
U_d	V	napětí statoru v příčné ose
u_f	V	napájecí napětí budicího obvodu SMCB
u^i	V	indukované napětí
U_i	V	střední hodnota indukovaného napětí
u_q	V	napájecí napětí SMCB
U_q	V	napětí statoru v podélné ose
v		vektor neměřených poruch
w		vektor žádaných hodnot
x		vektor stavových veličin
β		volitelná matice integračního zesílení Ljapunovova regulátoru
γ	rad	úhel mezi rotorem a pevným souřadným systémem statoru
δ		volitelná matice proporcionálního zesílení Ljapunovova regulátoru
ξ		konstanta buzení SMCB
Φ	Wb	magnetický tok
ΦB	Wb	magnetický tok rotoru vyvolaný permanentními magnety
ΨI	Wb	vektor spřaženého magnetického toku statorovým vinutím
ω	rad/s	úhlová rychlost
ωm	$rad/$	s úhlová rychlost mechanická (rotorová)

Seznam zkratek

DCC	Drive Control Chart.
PI	Proporcionální a integrační složka
RM	Referenční model
SMCB	Stejnoseměrný motor s cizím buzením
SMPM	Synchronní motor s permanentními magnety

Úvod

Dnes jsou již elektrické pohony velmi rozšířené, a můžeme je nalézt ve strojírenství, průmyslu i energetice. V minulosti se používali elektromotory neregulované s konstantní rychlostí, danou frekvencí sítě. I dnes můžeme nalézt elektromotory, které jsou používány tímto neefektivním způsobem. Z běžných aplikací jsou to nejrůznější ventilátory, čerpadla atd.

Ale se zvyšujícím se počtem použití těchto elektrických zařízení roste i požadavek na jejich efektivnost a hospodárnost. Proto se hledají nové způsoby řízení elektrických strojů, které by zlepšili jejich vlastnosti.

K tomu slouží například regulační struktury s referenčním modelem, které se používají pro pohony s vysokou dynamikou., zejména pak pro synchronní motory s permanentními magnety (SMPM). Právě touto metodou a její aplikací na pohon firmy Siemens Sinamics S120 se zabývá tato bakalářská práce. K naprogramování byl použit software SIMATIC SCOUT. Samotné řídicí struktury jsou vytvořeny za pomoci DCC editoru.

1. Matematické modely v programu Matlab

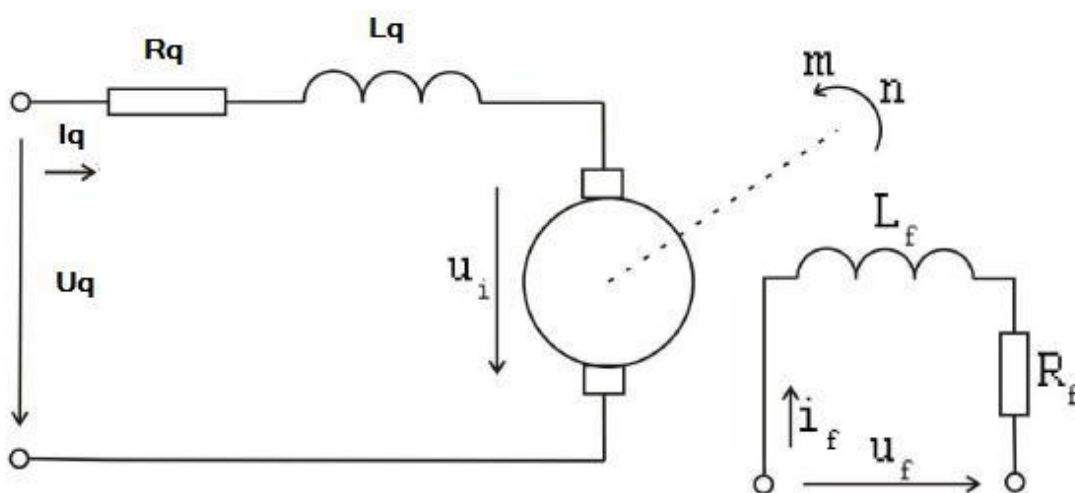
Práce se zabývá dvěma různými druhy motorů, a to stejnosměrným cize buzeným motorem s konstantním buzením a synchronním motorem s ornamentními magnety v rotoru. Pro tyto motory byly vyrobeny modely, na kterých probíhá simulace. Informace byly čerpány s literatury [1], [2] a [3].

1.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením

Dnes se stejnosměrné cize buzené motory používají především u jednodušších aplikací. Mezi jejich výhody patří zejména jednoduché řízení rychlosti, velký rozsah otáček a velký točivý moment.

Základní matematický model motoru odvodíme z elektrického schématu. Viz obr. 1.1. Matematický popis motoru je vyjádřen vztahy ze soustavy rovnic, které odvodíme z obr. 1.1.

Z rovnic můžeme sestavit blokové schéma stejnosměrného cize buzeného motoru obr. 1.2. Podrobnější výklad lze nalézt například v literatuře [3].



Obr. 1.1: Stejnosměrný motor s cizím buzením

Rovnice kotevního obvodu:

$$u_q = R_q \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + u_i \quad (1.1)$$

Rovnice budicího obvodu:

$$u_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (1.2)$$

Momentová rovnice:

$$m_h - m_z = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.3)$$

kde m_h je hnací elektromagnetický moment vytvářený kotvou motoru, m_z je zátěžný moment a J je moment setrvačnosti.

Vnitřní indukované napětí v kotvě lze vyjádřit následující rovnicí:

$$u_i = k \cdot C \cdot i_f \cdot \omega = k \cdot \Phi \cdot \omega = \xi \cdot \omega \quad (1.4)$$

Kde k , C , ξ vyjadřují veličiny úměrnosti, které se používají dle potřeby využití pro vyřešení dané úlohy.

Rovnice pro hnací elektromagnetický moment:

$$m_h = k \cdot c \cdot i_f \cdot i_q = k \cdot \Phi \cdot i_q = \xi \cdot i_q, \quad (1.5)$$

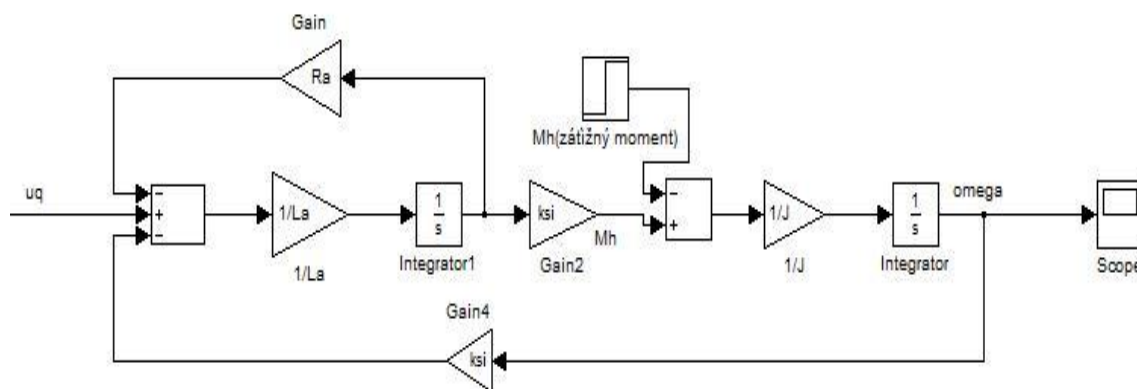
kde k je konstanta závislá na konstrukci stroje dána:

$$k = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \quad (1.6)$$

kde N je počet závitů kotvy.

Je-li buzení konstantní, platí:

$$\xi = k \cdot \Phi \quad (1.7)$$



Obr. 1.2: Blokové schéma stejnosměrného cize buzeného motoru s konstantním buzením

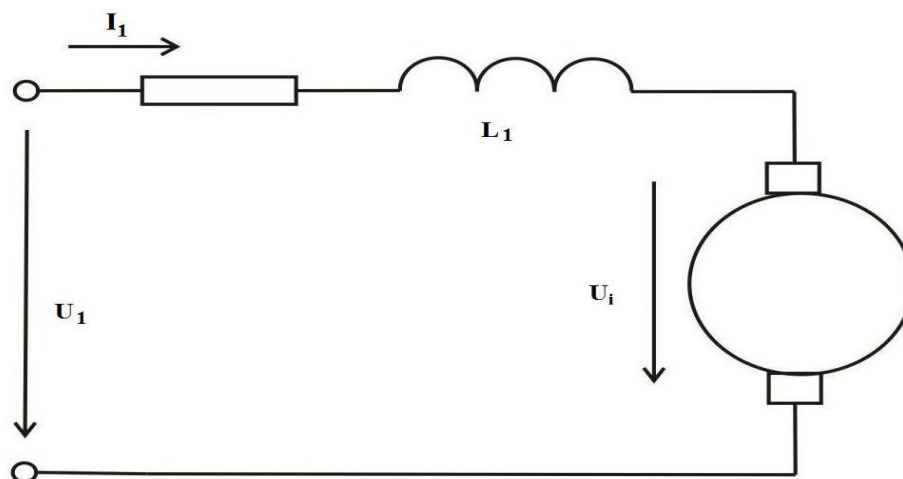
1.2 Synchronní motor s permanentními magnety

Motor je složen z rotoru a statoru. Na statoru je navinuto třífázové vinutí a v rotoru se nacházejí permanentní magnety. S tímto druhem motorů se můžeme setkat nejčastěji u servopohonů s vyšší dynamikou a s nízkými, nebo středními výkony. Kde postupně nahrazují, dnes již zastaralé servopohony se stejnosměrnými motory.

Oproti stejnosměrným strojům jsou SMPM méně náročné na údržbu a jsou menší, lehčí a mají i delší životnost, což je způsobeno absencí komutátoru. Permanentní magnety rotoru se vyrábějí z různých sloučenin kovů s magnetickými vlastnostmi, mezi něž patří Sm-Co, Nd-Fe-B. Více v literatuře [2]. Při matematickém popisu jsem vycházel z [1], [10].

Při vytváření matematického popisu synchronního motoru s permanentními magnety vycházíme z náhradního schématu zapojení na obr. 1.3. Musíme však uvažovat určitá zjednodušení:

- Ztráty v železe zanedbáme
- Neuvažujeme tlumicí vinutí v rotoru
- Nepřipojíme nulový vodič
- Magnetická charakteristika je lineární
- Průběhy indukovaného napětí a magnetické indukce jsou lineární
- L a R jsou ve všech fázích stejné



Obr. 1.3: Náhradní elektrické schéma SMPM

Pro odvození matematických rovnic k vytvoření blokového schématu se využívají prostorové vektory a transformace mezi souřadnými systémy. Podrobnější popis této problematiky lze nalézt v literatuře [2]. Pro lepší orientaci zde popisují následující postup odvození. Nejdříve si odvodíme rovnice v komplexním tvaru v souřadnicovém systému statoru, které následně převedeme do souřadnicového systému rotujících rychlostí ω . Poté rovnice vyjádříme ve složkovém tvaru, z nich už můžeme sestavit blokové schéma

Napěťové rovnice v pevných souřadnicích statoru a v komplexním tvaru:

$$U_1^S = RI_1^S + \frac{d\Psi_1^S}{dt} \quad (1.8)$$

$$\Psi_1^S = \Phi_B e^{j\gamma} + \Phi_{10} = \Phi_B e^{j\gamma} + L_1 I_1^S \quad (1.9)$$

kde:

Ψ_1^S je spřažený magnetický tok statorovým vinutím

Φ_B magnetický tok rotoru vyvolaný permanentními magnety

γ úhel mezi rotorem a pevným souřadným systémem statoru,

L_1 je celková indukčnost jedné fáze statorového vinutí včetně vlivu všech fází statoru,

$L_{1\sigma}$ rozptylová indukčnost jedné fáze statorového vinutí,

L_H hlavní magnetizační indukčnost ($L_1 = L_{1\sigma} + L_H$)

Po dosazení rovnice do rovnice vyjádříme rovnici:

$$U_1^S = RI_1^S + \frac{d}{dt} [\Phi_B e^{j\gamma}] + L_1 \frac{dI_1^S}{dt} = RI_1^S + L_1 \frac{dI_1^S}{dt} + U_1^S \quad (1.10)$$

Napět'ové rovnice v souřadnicích rotujících rychlostí ω v komplexním tvaru

K transformaci využijeme vztah $\mathbf{I}_1^R = \mathbf{I}_1^s e^{-j\gamma}$ a vyjádříme si rovnice:

$$R\mathbf{I}_1^R e^{j\gamma} + \frac{d}{dt}[\Phi_B e^{j\gamma}] + L_1 \frac{d}{dt}[\mathbf{I}_1^R e^{j\gamma}] = \mathbf{U}_1^R e^{j\gamma} \quad (1.11)$$

$$R\mathbf{I}_1^R + j\omega L_1 \mathbf{I}_1^R + L_1 \frac{d\mathbf{I}_1^R}{dt} + \mathbf{U}_1^R = \mathbf{U}_1^R$$

$$\text{kde} \quad \mathbf{U}_1^R = \frac{d\Phi_B}{dt} = j\omega \Phi_B$$

Napět'ové rovnice v souřadnicích rotujících rychlostí ω ve složkovém tvaru

$$U_d = RI_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q = RI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \quad (1.12a)$$

$$U_q = RI_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega\Psi_d = RI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega(L_d I_d + \Phi_B) \quad (1.12b)$$

kde

$$\Psi_d = L_d I_d + \Phi_B \quad (1.13a)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (1.13b)$$

$$\Phi_B = \text{konstanta}$$

Z rovnic 1.13a a 1.13b si pro snadnější vytvoření blokového schématu můžeme vyjádřit rovnice:

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{R}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} \omega I_q + \frac{U_d}{L_d} \quad (1.14a)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{R}{L_q} I_q + \frac{L_d}{L_q} \omega I_d - \frac{\Phi_B}{L_q} \omega + \frac{U_q}{L_q} \quad (1.14b)$$

Moment motoru lze vyjádřit:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} p_p \operatorname{Im}[\Psi_1^* I_1] = \frac{3}{2} p_p (\Psi_q I_d - \Psi_d I_q) = \\ &= \frac{3}{2} p_p [\Phi_B I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \end{aligned} \quad (1.15)$$

Hlavní složka momentu je vyjádřena prvním součinem v hranaté závorce. Druhý výraz představuje tzv. reluktanční moment, který uvažujeme pouze tehdy, není-li L_d roven L_q (stroj má vyniklé póly).

Abychom mohli dokončit sestavení blokového schématu motoru, zbývá nám sestavit pohybovou rovnici:

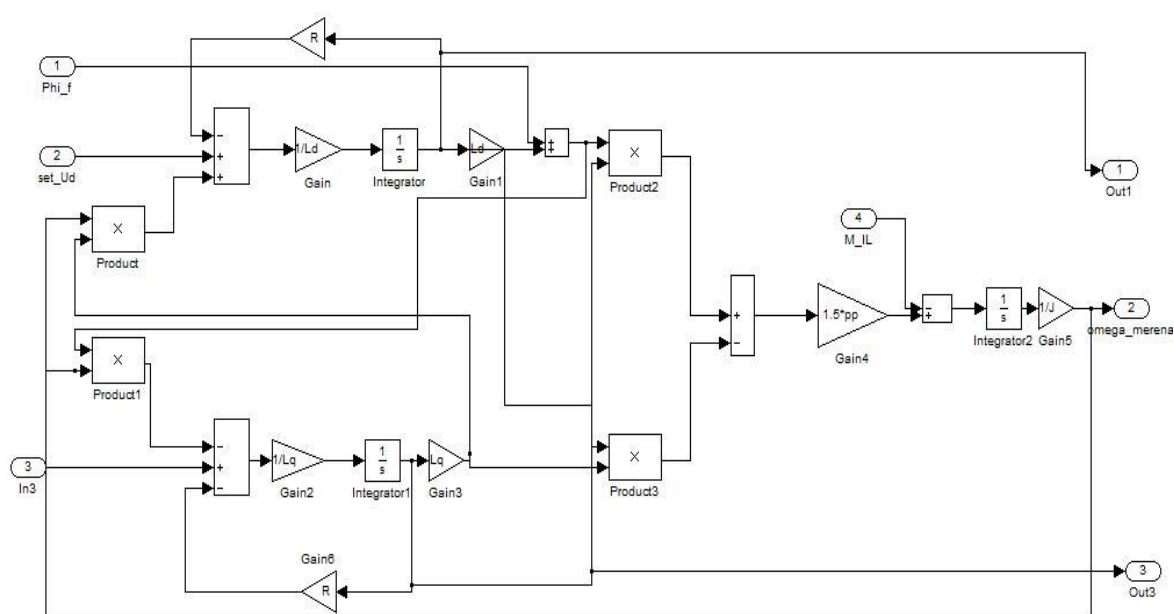
$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_z \quad (1.16)$$

Po upravení výše uvedené rovnice a dosazením do 1.15 dostaneme:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M-M_z}{I} = \frac{3p_p}{2I} [\Phi_{\mathbf{B}} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] - \frac{M_z}{I} \quad (1.17)$$

Nyní již máme všechny potřebné rovnice ve složkovém tvaru v souřadnicích rotujících rychlostí k sestavení blokového schématu, které je uvedeno na obr. 1.4.

Výsledný model bývá označován jako DQ-model. Jde o nejpřesnější a nejpoužívanější matematické vyjádření synchronního motoru s permanentními magnety pro klasickou regulaci viz literatura [10] [1], [3].



Obr. 1.4: Blokové schéma SMPM

2. Klasické regulační struktury

Pro řízení elektrických pohonů se stejnosměrnými motory se velmi často používá tzv. kaskádní struktura. Řízenými veličinami je zde proud, otáčky a případně i poloha. Proudová regulační smyčka slouží k urychlení regulace proudu. U proudové smyčky nám stačí k regulaci pouze PI regulátor.

Nejčastěji se můžeme setkat s elektrickými pohony, u nichž je hlavní řídící veličina úhlová rychlost a proudová smyčka je podřízená. Tyto stejnosměrné motory se nazývají otáčkové. I zde je použit regulátor typu PI.

Ale například u robotů se můžeme setkat s tím, že se pohony řídí jako polohové. V tom případě je zde navíc polohová smyčka, která je nadřazená proudové i otáčkové smyčce. U polohové smyčky stačí k regulaci pouze proporcionální regulátor.

K nalezení parametrů regulátorů můžeme použít klasické metody seřizování a při seřizování postupujeme od smyček podřízených k smyčce nadřazené. Podrobnější informace v literatuře [1], [2], [3], [10]

Řízení pohonů s motory napájené střídavým proudem je složitější. Znovu se k řízení většiny pohonů používá kaskádní struktura. U střídavých pohonů rozeznáváme dva rozdílné způsoby základních principů řízení. První způsob řízení se nazývá skalární řízení, jde o jednoduché řízení, které je vhodné především pro regulaci veličin v ustálených hodnotách. Jeho použití se však u dynamicky náročnějších aplikací nedoporučuje. Princip algoritmu vychází z požadavku konstantního magnetického toku. Tímto způsobem řízení se v bakalářské práci dále nezabývám, protože se nehodí pro dynamičtější aplikace. Metoda je podrobněji popsána v literatuře [2], [3].

Druhý způsob je vektorové řízení. Pracuje na principu odděleného řízení spřaženého magnetického toku motoru a řízení vnitřního elektromagnetického momentu. Vektor statorového proudu fiktivně rozdělíme na dvě složky. Velikost magnetického toku se řídí pomocí tokotvorné složky I_d . Magnetický moment se řídí podle momentotvorné složky I_q . Vektorové řízení dále dělíme podle toho, jestli řídíme napětí, nebo proud. Rozlišujeme také, jestli řídíme statorové, nebo rotorové veličiny. Podrobnější informace lze nalézt v literatuře [2]

2.1 Regulace stejnosměrného motoru s cizím buzením

Jak bylo již řečeno, klasická regulace probíhá v kaskádní struktuře. Řízení otáček je zde dáno vztahem:

$$\omega = \frac{U_q - R_q i_q}{\xi} \quad (2.1)$$

který lze odvodit z rovnice x pro konstantní proud (jde o ustálený stav) a indukované napětí platí $u_i = \xi \omega$.

Blokové schéma řízení je naznačeno na obr. 2.2. Hodnoty jednotlivých veličin pohonu byly dosazeny podle přílohy. Pro výpočet parametrů regulátoru můžeme použít kterýkoliv klasický algoritmus. Uvedme aspoň několik příkladů možností výpočtů:

- pomocí frekvenčního kriteria
- pomocí Lineární regulační plochy
- pomocí integrálních kritérií

Nebo použijeme experimentální metody, mezi něž patří:

- dle Chien, Hrones, Reswicka
- dle Ziegler-Nicholse

Poslední možností jak zjistit parametry regulátoru je ruční nastavení metodou „pokus-omyl“. Zde jsem se rozhodl pro ruční nastavení konstant regulátoru.

Přesnější metody nastavení jsou uvedeny v [1].

Používám PI regulátory, které lze popsat rovnicí:

$$R(s) = K \cdot \frac{T \cdot s + 1}{T \cdot s}, \quad (2.2)$$

kde K je proporcionální zesílení

PI regulátor používaný v Matlabu má tvar:

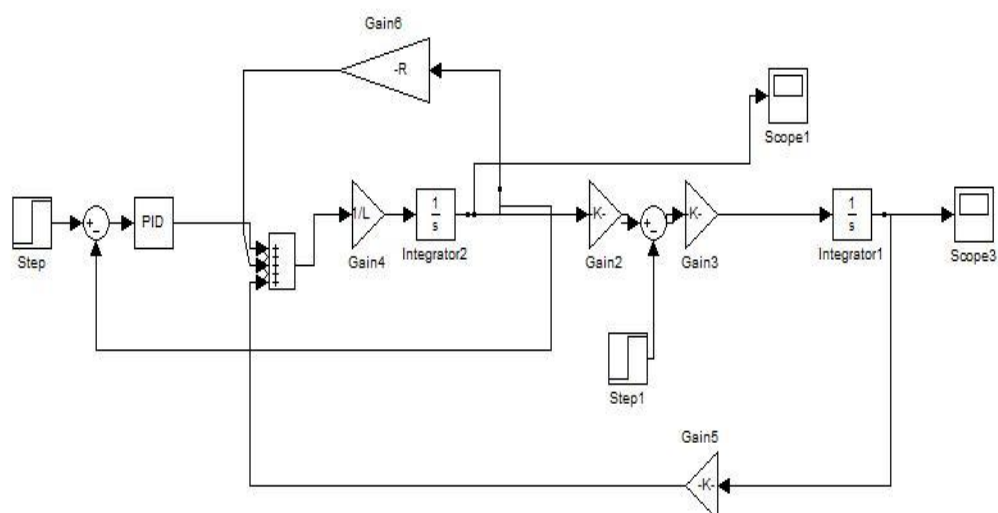
$$R(s) = P + \frac{I}{s} \quad (2.3)$$

Chceme-li přejít jednoho typu regulátoru na druhý, musíme přepočítat konstanty s využitím následujících vztahů:

$$P = K \quad (2.4)$$

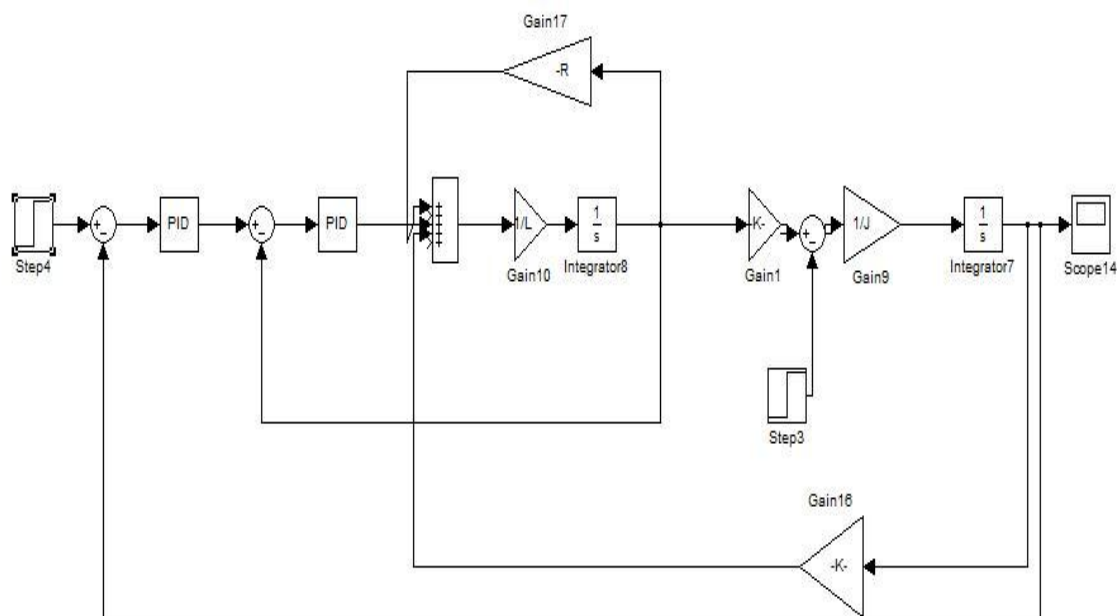
$$I = \frac{K}{T} \quad (2.5)$$

Proudová smyčka je nakreslena na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma proudové smyčky

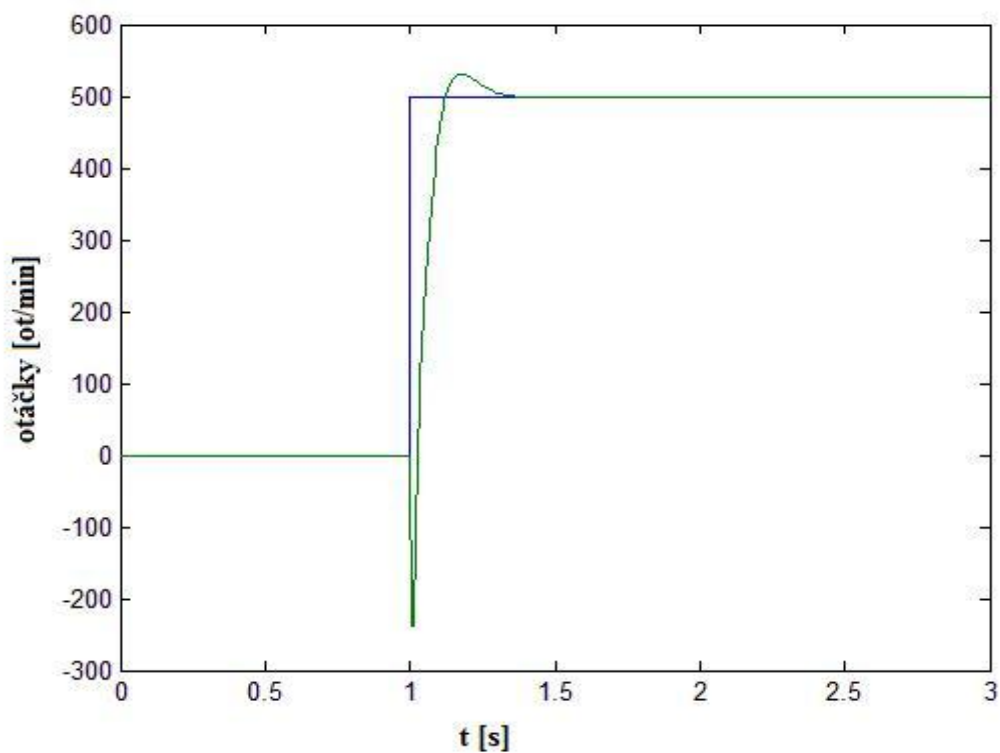
Na obr. 2.2 je znázorněna celková regulační struktura stejnosměrného motoru s cizím buzením. Vstupem jsou zde požadované otáčky (v rad/s) a na výstupu se nám zobrazí výsledné otáčky opět v základních fyzikálních jednotkách.



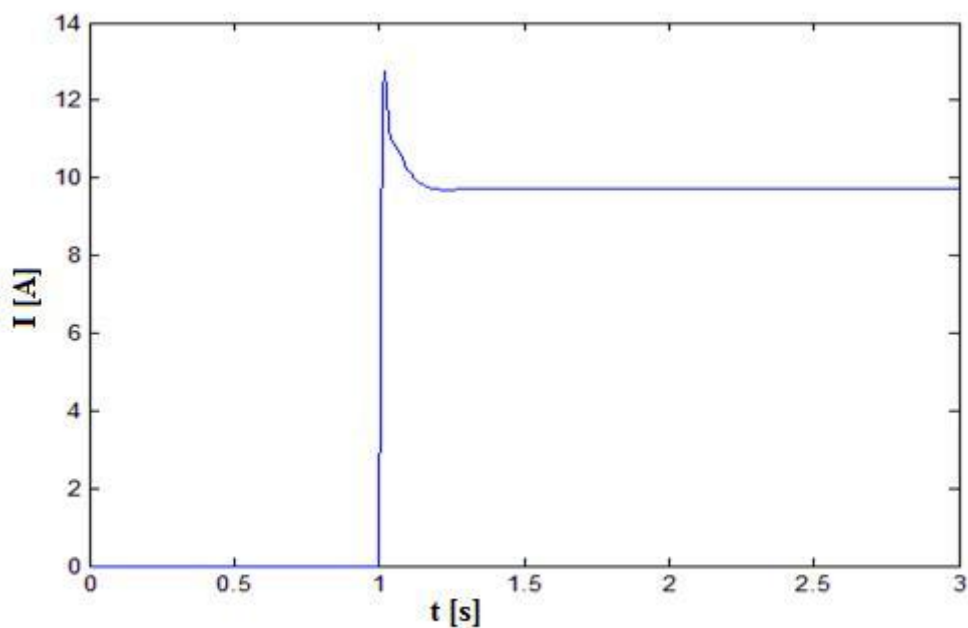
Obr. 2.2: Celková regulační struktura stejnosměrného motoru s cizím buzením

PI regulátor otáčkové smyčky byl nastaven na následující hodnoty: $K_p = 2$; $T_i = 0,008$ s a regulátor proudové smyčky byl nastaven na $K_p = 0.3$ a $T_i = 1$ s.

Na obr. 2.3 je vidět průběh otáček v čase z 0 na 500 ot/min v čase $t = 1$ s je do systému přivedena chyba o velikosti 5 Nm. Modře je znázorněna požadovaná hodnota a zeleně je požadovaná hodnota otáček. Jak je patrné z grafu žádaných hodnot otáček dosáhneme v čase $t = 1,38$ s. Průběh proudu SMCB při řízení otáček je ukázán na obr. 2.4.



Obr. 2.3: Průběh otáček SMCB na skok žádané hodnoty otáček a chyby v podobě 5 Nm.



Obr. 2.4: Průběh proudu SMCB při řízení otáček

2.2 Řízení synchronního motoru s permanentními magnety

Synchronní motory s permanentními magnety lze řídit podle rozdílných kritérií. Pro představu si zde uvedeme několik nejpoužívanějších způsobů řízení:

- ME (maximum efficiency). Jde o metodu používanou u motorů, které jsou poháněny bateriemi. Cílem této metody je udržení maximální účinnosti.
- CMFL (constant mutual flux linkage). Způsob řízení založený na udržování konstantního spřaženého magnetického toku.
- MTPC (maximum torque per unit current). Metoda založená na maximální přeměně Proudů na moment.
- UPF (unity power factor). Metoda udržující jednotkový účinník odebírané energie.
- ZDAC (zero d-axis current). Jde o metodu, která je velmi využívána v praxi, nejvíce pak v průmyslu. Tokotvorná složka proudu I_d je udržována na nulové hodnotě, díky tomu je moment stroje přímo úměrný amplitudě statorového proudu.

Při použití vektorového řízení SMPM, se rozdělí proud na tokotvornou složku I_d a momentotvornou složku I_q . Použijeme metodu řízení ZDAC při které I_d řídíme na nulovou hodnotu pomocí regulátoru, který je vypočten pro I_q .

Během seřizování regulátoru postupujeme od podřízené smyčky ke smyčce nadřazené. Seřizujeme tedy nejdříve smyčku proudovou a po ní přejdeme ke smyčce otáčkové.

Na reálném pohonu si řídicí jednotka většinou sama seřídí proudovou smyčku. Uživatel do ní nemůže vůbec zasahovat, a pokud ano, tak jen v minimální míře. Přesné hodnoty regulátorů mohou být určeny různými metodami podobně jako u stejnosměrného motoru s cizím buzením. Konstanty regulátorů byly nastaveny ručně. Žádané hodnoty byly vypočteny pomocí programu uvedeného v [1].

3. Regulační struktura s referenčním modelem

Regulační struktury jsou velmi vhodné pro řízení procesů s velmi vysokou dynamikou. Referenční model se v řídicí struktuře používá, aby přesněji předepisoval chování systému. Odstraní se tím následující nežádoucí vlivy:

- Změna parametrů vlivem prostředí (změny teploty)
- Nepřesné určení parametrů systému
- Zajišťuje stabilitu systému v celém jeho rozsahu
- Odstranění neměřitelných poruch

Referenční model by měl být lineární, rovněž by měl odpovídat statickým i dynamickým vlastnostem námi řízeného systému. Při řízení se od veličin modelu odečtou aktuální veličiny reálného systému. Z rozdílu těchto dvou veličin se vypočte nový akční zásah, který je následně veden do systému.

3.1 Rozdělení systémů s referenčním modelem

V literatuře se velmi často můžeme setkat se zkratkou MRAS z anglického Model Reference Adaptive System. Jde tedy o adaptativní řízení s referenčním modelem. Někdy bývá tento způsob označován také jako řízení regulátorem s referenčním modelem (Model Reference Adaptive Controller - MRAC). Výše uvedený způsob řízení se dá rozdělit na dvě rozdílné skupiny, které krátce popisují následující podkapitoly.

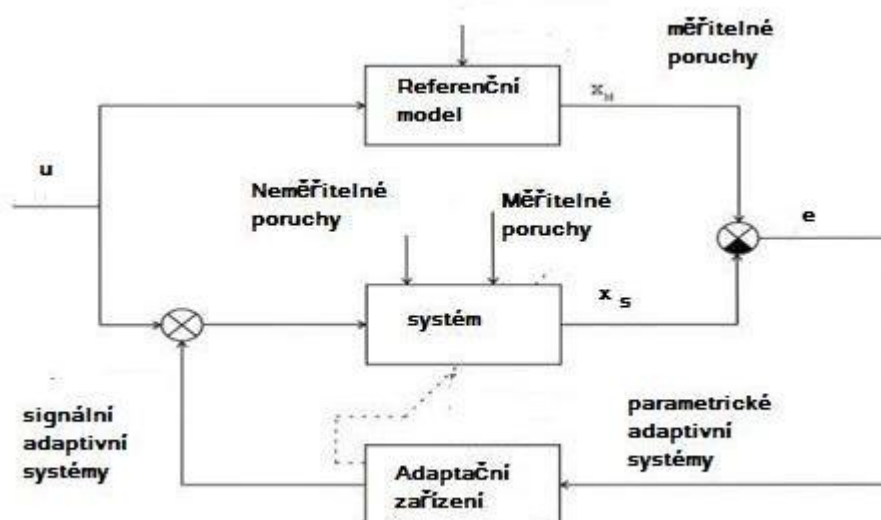
3.1.1 Parametrické adaptivní systémy

Hned na začátku je potřeba uvést omezení a nevýhody u této metody řízení. U této metody se využívají velmi komplexní a časově náročné výpočetní algoritmy, aby bylo možné měnit online parametry řídicích prvků, musíme použít velmi výkonné řídicí systémy, zejména pak nadřazené PC, které realizuje samotný výpočet.

V průmyslovém nasazení je však kladen velký důraz na bezpečnost a spolehlivost řídicích systémů. Právě kvůli vysokým požadavkům na spolehlivost není možné použít pro výpočty nadřazené PC. Díky tomu je použití parametrických adaptivních systémů v běžném průmyslu téměř vyloučeno, lze se s ním setkat v laboratořích, kde nároky na spolehlivost nejsou tak vysoké. Právě pro velmi obtížné nasazení v průmyslu a složitosti se nebudu touto strukturou dále zabývat. Struktura řízení je uvedena na obr. 3.1.

3.1.2 Signální adaptivní systémy

U této metody se využívá tzv. korekční signál. Jeho výpočet není tak náročný jako u předchozí metody a řídicí jednotky pohonu by měly být schopny výpočet vyřešit. Struktura řízení je velmi podobná první variantě a na obr. 3.1 je znázorněna plnou čarou.



Obr. 3.1: Parametrické a signální adaptivní systémy

Ve většině případů se používá paralelní tvar regulátoru, který je také znázorněn na obr. 3.1. Kromě paralelního adaptivního systému s referenčním modelem se můžeme setkat se sériovým anebo sérioparalelním adaptivním systémem s referenčním modelem.

3.2 Řízení pohonů s referenčním modelem pomocí II. Ljapunovovy metody

V literatuře se můžeme setkat s touto metodou řízení v několika odlišných variantách, které se liší podle toho, jaký systém mají regulovat. Metoda vychází z důsledků II. Ljapunovovy věty, která někdy bývá označována jako přímá Ljapunovova věta. Informace k tomuto způsobu řízení jsem čerpal z [6], [1], [10].

3.2.1 Princip II. Ljapunovovy metody

Druhá Ljapunovova metoda určuje stabilitu systému pomocí diferenciálních rovnic:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{x}(t), t] \quad (3.1)$$

,kde $\mathbf{x}(t)$ je n -rozměrný stavový vektor proměnných, vůči kterým vyšetřujeme stabilitu systému. Chceme-li určit stabilitu tohoto systému, musíme nejdříve vypočítat řešení systému. Výpočet řešení by byl velice obtížný, v některých případech dokonce až teoreticky nemožný. Proto druhá Ljapunovova rovnice předepisuje určení stability systému, aniž bychom museli znát řešení rovnice. Dosáhne toho tím, že zvolí funkci $|\mathbf{v}(t)| \geq |\mathbf{x}(t)|$, vzdálenost $\mathbf{x}(t)$ od nuly je vždy menší nebo rovna vzdálenosti $\mathbf{v}(t)$ od nuly. Pokud je $\mathbf{v}(t)$ stabilní, vyplývá z ní i stabilita systému $\mathbf{x}(t)$.

Bylo řečeno v [6]:

II. Ljapunovova věta o stabilitě systému říká:

Jestli je systém 3.1 takový, že existuje Ljapunovova funkce $V[\mathbf{x}(t), t]$ kladně definitní v nějakém okolí nulového řešení, které derivace vypočítaná na základě 3.1 je záporně definitní, potom nulové řešení $\mathbf{x}(t)=0$ systému 3.1 je asymptoticky stabilní.

3.2.2 Regulační struktura s referenčním modelem pomocí II. Ljapunovovy metody

Na obrázku 3.2 je naznačena struktura, která je vhodná pro řízení elektrických pohonů. Celý systém je možné popsat stavovými rovnicemi podle rovnice

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}[\mathbf{x}, t] \times \mathbf{x} + \mathbf{B}[\mathbf{x}, t] \times \mathbf{u} + \mathbf{v}, \quad (3.2)$$

Kde $\mathbf{A}[\mathbf{x}, t]$ a $\mathbf{B}[\mathbf{x}, t]$ značí nelineární časově nezávislé matice, \mathbf{u} je vstupní vektor pro kompenzaci neměřitelných poruch a \mathbf{v} je časově proměnlivý vektor těchto poruch. Při použití této metody regulace nepotřebujeme udržovat nulový stav stavového vektoru \mathbf{x} , je však nezbytně nutné udržet nulovou regulační odchylku od žádaných hodnot. Žádané hodnoty jsou nastavovány pomocí referenčního modelu. Jak již bylo řečeno, referenční model by měl být lineární, abychom dosáhli dobrých regulačních vlastností. Referenční model můžeme definovat pomocí rovnice:

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \cdot \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \cdot \mathbf{w} \quad (3.3)$$

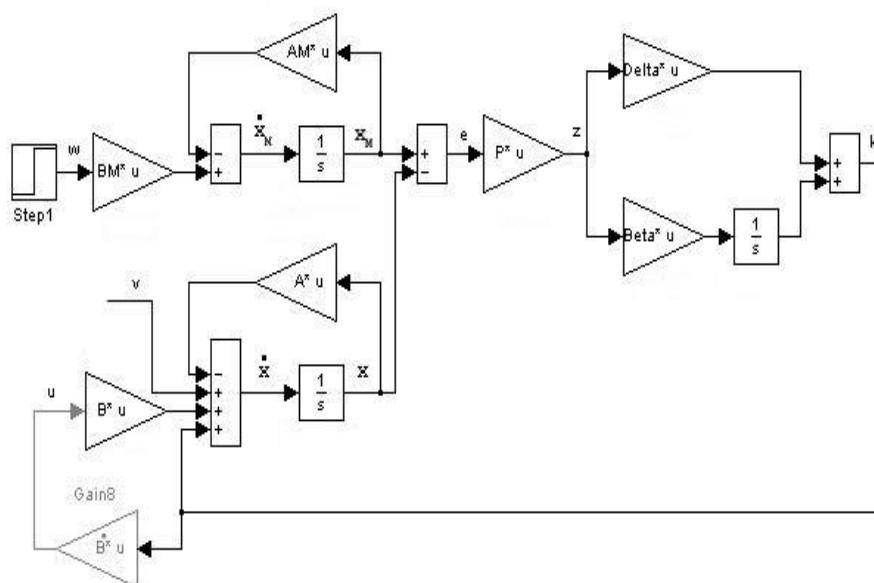
Protože úplné popsání II. Ljapunovovy funkce je velmi komplikované a dlouhé dále uvedu jen nejdůležitější vztahy a rovnice. Odvození těchto vztahů a rovnic nalezneme v literatuře [1].

Pro tvorbu regulační struktury s referenčním modelem podle Ljapunova je velmi důležitá následující rovnice:

$$\mathbf{A}_M^T \cdot \mathbf{P} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{A}_M = -\mathbf{Q} \quad (3.4)$$

Při tvorbě regulační struktury referenčního modelu podle Ljapunova postupujeme podle následujících kroků. Nejprve si musíme zvolit matici \mathbf{Q} , pomocí předchozí rovnice si vypočteme matici \mathbf{P} . V následujícím kroku je potřeba vhodně si zvolit matici β a α , jejichž prvky by měli být co největší, zároveň však musíme brát ohled na omezení reálného pohonu. Nemůžeme překročit maximální proud atd.

Můžeme říci, že prvky matice δ zastupují proporcionální zesílení a prvky matice β zastupují integrální složku. Regulátor vytvořený podle výše uvedeného postupu vylepšuje dynamiku systému a zároveň kompenzuje neměřitelné poruchy a odstraňuje případné nedokonalé určení parametrů systému. Dalším velmi důležitým krokem je výběr referenčního modelu, který nám určuje dynamické chování námi regulovaného systému. Referenční model musí mít fyzikální dynamické a statické vlastnosti řízeného systému. Nesmíme zapomenout, že tento referenční model musí být lineární.



Obr. 3.2: Stabilní regulační struktura s referenčním modelem

Na uvedenou regulační strukturu je udělené autorské osvědčení [7].

3.2.3 Ljapunovova metoda pro regulaci rychlosti servopohonu

V této kapitole použijeme výše uvedené postupy, vytvoříme uvedenou regulační strukturu rychlostní regulace servopohonu a otestujeme její vlastnosti.

Námi regulovaný systém bude zastoupen simulačním modelem včetně otáčkové regulační i proudové regulační smyčky. Otáčkový regulátor má následující parametry: $K_p = 0,8$ a $T_i = 1$. Parametry proudového PI regulátoru byly nastaveny na uvedené hodnoty: $K_p = 2$ a $T_i = 0,008$. Nadřazená Ljapunovova regulace bude sloužit k vygenerování jednorozměrného kompenzačního vektoru k , který bude určovat žádané hodnoty otáček, tak aby chování systému a referenčního modelu bylo shodné.

Referenční model je znázorněn na obr. 5.1, jak je patrné z obrázku referenční model má pouze otáčkovou regulační smyčku, proudová regulace byla kvůli zjednodušení referenčního modelu vynechána.

Celkové regulační schéma je zobrazeno na obr. 5.5 Model regulovaného otáčkového je znázorněn modrým blokem a regulační obvody podle Ljapunova jsou znázorněny zeleně.

Existují i rozšířené a komplexnější metody podle Ljapunovova. Podrobnější popis v literatuře [1].

4. Implementace vybraných regulačních struktur do průmyslového pohonu

V následující části se budeme zabývat aplikací vybraných regulačních struktur s referenčním modelem do pohonu Siemens Sinamics S120. V první části si představíme pohony Sinamics a možnosti rozšíření vnitřních řídicích struktur elektrického pohonu a druhá část se zaměří na samotnou realizaci.

4.1 Pohony Siemens

Pohony od firmy Siemens lze rozdělit do dvou základních skupin:

SINAMICS G – Jsou vhodné pro aplikace s asynchronními (indukčními) motory, kde nemají příliš velké požadavky na dynamiku a přesnost řízení pohonu.

SINAMICS S120 Určeno pro složitější úlohy řízení pohonů asynchronních, synchronních nebo indukčních. Jsou schopny splnit i nejpřísnější požadavky týkající se:

- vysoké dynamiky a přesnosti
- schopnost integrovat rozsáhlé technologické funkce do kontrolní jednotky systému

Díky těmto vlastnostem je použití řídicí struktury s referenčním modelem velmi vhodné.

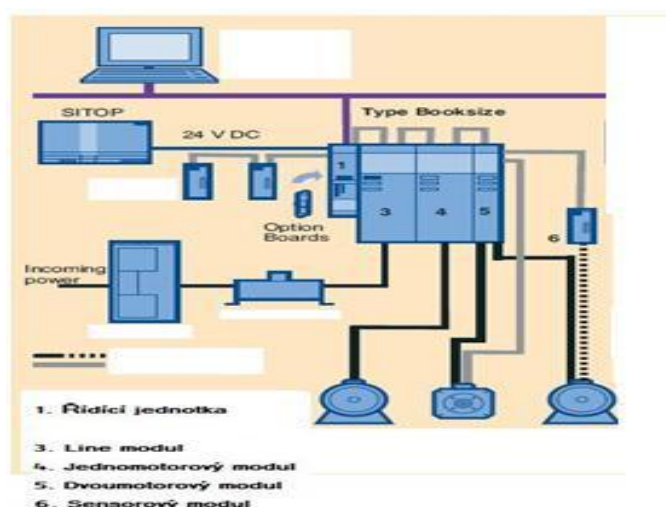
Pohony Siemens Sinamics S120 umožňují rozšířit svojí řídicí strukturu podle potřeb uživatele. K tomuto účelu je k dispozici určitá volná paměť, do které můžeme nahrát vlastní řídicí strukturu podle aktuálních potřeb. K rozšíření základní řídicí struktury byl použit software Simotion Scout, který si podrobně popíšeme v dalších kapitolách.

4.2 Systém řízení elektrických pohonů Siemens S120

Celý systém elektrických pohonů je uspořádán jako modulární, aby byl do značné míry velmi variabilní a většina jeho součástí má universální způsob použití.

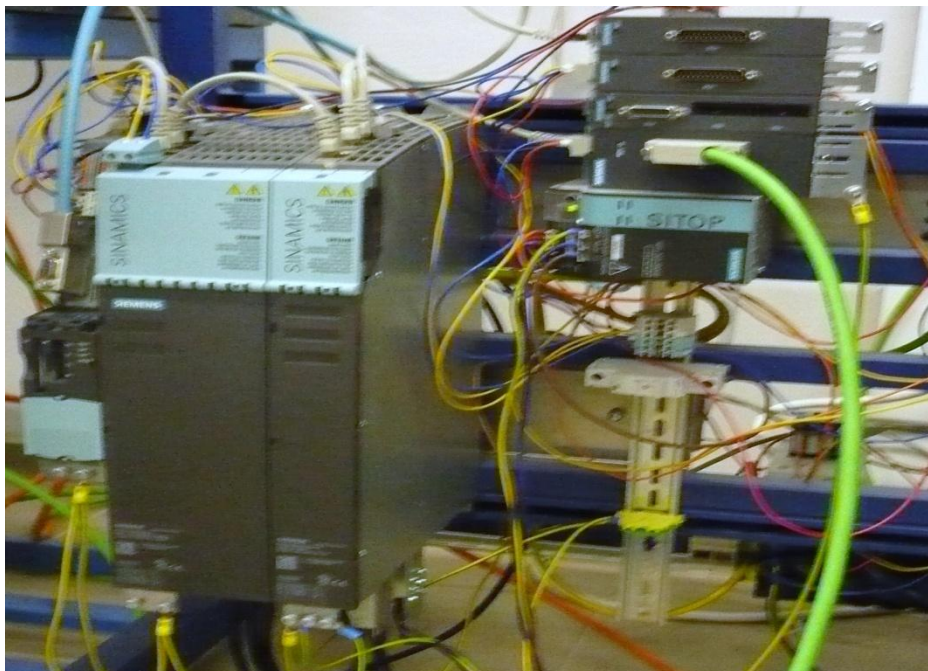
Systém řízení se může skládat z následujících prvků:

- Control unit
- Active Interface Module
Interface modul musí být použit spolu s Line Module. Poskytuje základní EMC stínění. V kombinaci s S120 ovladači pohonu SINAMICS Drive Firmware 2.5SP1, Active Interface module mohou být použity pro připojení napájení pro SINAMICS S120 Booksize
- Line Module (Basic, Smart, Active):
Komponenta Line Module obsahuje výkonovou část usměrňovače. Vyrábí se ve třech různých variantách (Basic, Smart, Active).
Řada Basic neumožňuje rekuperaci elektrické energie (získání elektrické energie z brzdění). Řada Smart umožňuje rekuperaci elektrické energie pomocí tyristorů, ale průběh vraceného elektrického proudu do sítě není zcela sinusový. Oproti tomu řada Active vrací do sítě proud, který má sinusový průběh.
- Single Motor Module
Modul zajišťující napájení připojeného motoru. Napájení je zajištěno pomocí "DC Link". Umožňuje napájení jednoho motoru. Musí být připojen ke Control unit přes DRIVE CLiQ.
- Double Motor Module
Shodné se Single Motor module, ale umožňuje napájet dva motory.
- Sensor Module
Umožňuje zpracovávat signály ze senzorů polohy a rychlosti.



Obr. 4.1: Možné propojení komponent pohonu.

Na obr. 4.1 je naznačeno možné propojení hardwarových komponent. Jak je patrné z obrázku jde o provedení Booksized. Fialově je znázorněno propojení přes PROFI BUS. Celý systém je ovládán přes terminál. Pohon, na němž probíhala praktická část práce je zobrazen na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Komponenty pohonu, na kterém byly vyzkoušeny regulační struktury s RM podle Ljapunova.

4.2.1 Řídicí jednotka

V Řídicí jednotce CU320 probíhá komunikace open loop a closed loop řídicích funkcí pro Motorové moduly a Active Line modul. Jednotka dovoluje řídit více os zároveň. Možný způsob připojení řídicí jednotky je naznačen v příloze.

Firmware a nastavení parametrů je uloženo na paměťové kartě typu CompactFlash, díky tomu je možné změnit nastavení kontrolní jednotky bez potřeby dalších nástrojů jednoduchou výměnou flash karty. Stav jednotky je signalizován pomocí barevných led indikátorů. Komunikace mezi kontrolní jednotkou a připojenými komponenty probíhá prostřednictvím DRIVE CLiQ. Pokud aplikace vyžaduje více než jednu řídicí jednotku, může být jejich počet navýšen. Řídicí jednotky jsou pak mezi sebou propojeny například přes PROFIBUS.

4.3 Simotion Scout

Jde o softwarové prostředí pro tvorbu aplikací na řídicí systém Simotion (simotion je určen jako nadřazený řídicí systém pro pohony sinamics S120 – dovoluje vytvářet elektronické vazby mezi jednotlivými osami systému S120). Řídicí systém Simotion pracuje na principu multitaskingu. Jednotlivé úlohy se programují v grafických blocích, které se podobají vývojovému diagramu.

Simotion Scout obsahuje následující součásti:

- Manažer projektu, který je svou strukturou shodný se Simatic Manager.
- Vývojové prostředí pro graficky orientované programovací jazyky.
- Nástroj Starter pro konfiguraci a nastavení pohonů, který je potřebný pro uvedení moderních frekvenčních měničů produktové skupiny Sinamics do provozu.
- Od verze 4.1 obsahuje grafický programovací nástroj Drive Control Chart (DCC).

K naprogramování vybraných referenčních struktur byl použit grafický programovací jazyk DCC, kterému se budou věnovat následující kapitoly.

4.3.1 Práce ve stavu online

Po zapnutí Simotion Scout je třeba založit nový projekt a zvolit vhodná nastavení. Více o vytvoření nového projektu se můžeme dočíst v literatuře [5]. Po úspěšném založení projektu můžeme z režimu offline přejít do online režimu. Nyní máme přístup ke všem důležitým informacím v reálném čase a především můžeme námi naprogramované změny aplikovat na reálný pohon. Pro zobrazení hodnoty signálů a veličin (například otáčky, proud atd.), slouží tzv. expert list, ten je zobrazen na obr. 4.3. V režimu online jsou k dispozici další důležité funkce jako měření zvolených parametrů a právě měřením a jeho možnostmi se zabývá následující text.

Parameter	D	+	-	Parameter text	Value Drive_1	Unit	Modifiable to	Access I	Minimum	Maximum
p21536				delta(12)	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21537				delta(22)	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21538				beta(11)	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21539				beta(21)	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21540				beta(12)	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21541				beta(22)	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21545				ot nula	1.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21560				otackovy	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21564				otackovy P zesileni	2.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21565				otackovy Ti	0.008		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21568		+		nulovaniintegratoru	1H		Operation	1	0H	1H
r21577					0.000			1		
r21578				otackovy	0.000			1		
r21580				trigger	0.000			1		
r21582				vektor2votzamin	0.000			1		
r21583				otackovyMODELuzaSEKUNDU	0.000			1		
p21584					Drive_1 : r63		Ready to run	1		
r21585					0.000			1		
p21591				Mz	0.000		Operation	1	-3.40282E+038	3.40282E+038
p21599					Drive_1 : r899.1		Ready to run	1		
r21600					0.000			1		
r21601					0.000			1		

Obr. 4.3: Expert lists pro nastavení a prohlížení parametrů (signálů).

4.3.2 Měření v Simotion Scout

Měření parametrů a grafický záznam v SSC se provádí pomocí funkce *Trace*, protože možnosti nastavení měření jsou rozsáhlé, soustředím se zde pouze na to, co jsem k měření sám potřeboval. Možnosti nastavení jsou vidět na obr. 4.4. Jak je z obrázku patrné nejprve je nutné si zvolit parametry, které chceme měřit. Dalším užitečnou vlastností je možnost nastavit si začátek nahrávání. Jsou zde následující možnosti:

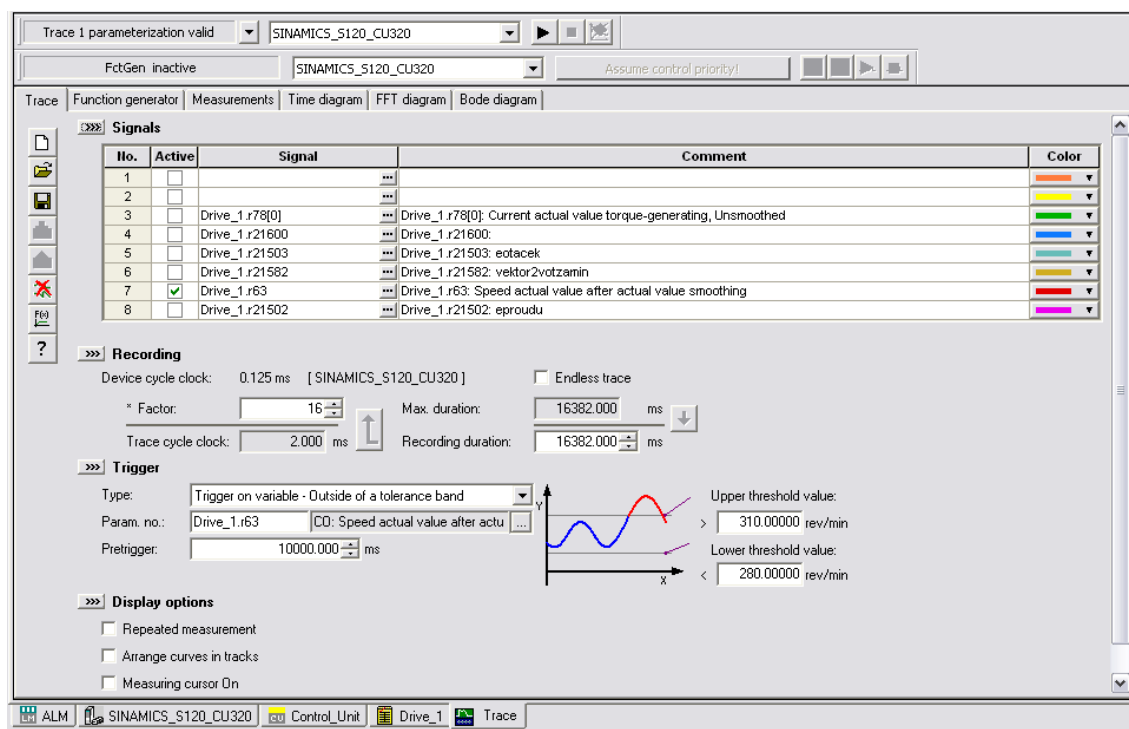
- Immediately recording – Nahrávání se spustí okamžitě po zmáčknutí tlačítka Start.
- Without reference
- Outside reference

Při použití Without reference a Outside reference se vybíráme parametr, který je porovnáván a nahrávání se spustí až tehdy, když je splněna nastavená podmínka.

To se nám hodí při měření průběhu více parametrů, protože čím více jich měříme, tím máme k dispozici menší maximální čas měření (kvůli omezené paměti pro ukládání dat měření). Celkový čas lze zvýšit zvětšením parametru *cycle factor*, který určuje, jak často má být hodnota měřena a ukládána.

Někdy však potřebujeme zobrazit průběh, ještě před začátkem vlastního měření, k tomu slouží parametr *pretrigger* do kterého se vkládá čas, po který bude průběh

zaznamenán, ještě před začátkem měření. Podrobnější informace jsou uvedeny v literatuře [1].



Obr. 4.4: Nástroj na měření průběhů signálů

4.3.3 Archivování a obnova zálohovaných dat

Mezi velmi užitečné nástroje, které určitě většina uživatelů ocení., patří určité funkce archivování a obnovení dat z archivu. Chceme-li si vytvořit záložní archiv projektu, stačí vybrat možnost *archive*. Obnovení projektu provedeme vybráním možnosti *Retrieve from archive*. Použití nástroje pro archivaci a obnovu projektu způsobí odpojení od pohonu (jsme-li v době použití online) a přechod do offline módu.

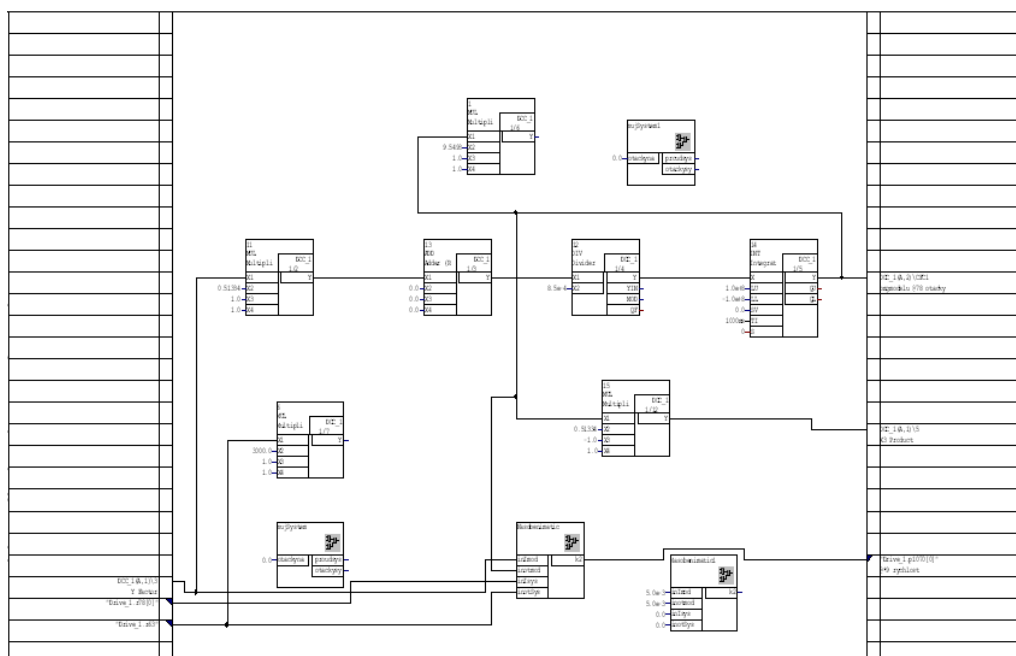
4.4 BICO technologie

Pohony S120 od Siemensu používají tzv. BICO technologii (Binector Connector Technology). Tato technologie umožňuje pohonům přizpůsobit se různým podmínkám. Digitální a analogové signály lze propojovat podle potřeby což je velkou výhodou oproti jiným pohonům (kde jsou možnosti úpravy regulační struktury výrazně omezené). Při použití BICO máme tedy velkou volnost v propojování signálů. Právě kvůli této volnosti však použití BICO technologie klade velké požadavky na znalosti a praktické zkušenosti uživatele. Aby bylo možné jednotlivé signály od sebe odlišit je každému (signálu) přiřazen parametr, který ho jednoznačně identifikuje. Některé

parametry jsou již napevno přiřazeny k určitým signálům a parametry p21500 až p21599 můžeme libovolně přiřadit podle naší potřeby.

4.5 Editor DCC

Jak již bylo řečeno je tento editor součástí Simotion Scout od verze 4.1 a vyšší. Pod názvem DCC se skrývá grafické programování pomocí tzv. volných funkčních bloků, které umožňují realizovat logické či aritmetické funkce potřebné pro řízení pohonu. Tyto volné bloky se mezi sebou propojují a tím vytváří výslednou řídicí strukturu. A právě propojováním se budeme zabývat v následující části. Podrobnější informace jsou uvedeny v [9]. Ukázka vlastní regulační struktury na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Ukázka tvorby vlastní regulační struktury

4.5.1 Vložení nového DCC Chartu

Vlastní (uživatelem vytvořenou) řídicí strukturu budeme vkládat do tzv. DCC Chartu. Nejprve je nutné DCC chart přiřadit k HW komponentě, která obsahuje procesor a dovoluje DCC chart vypočítávat. Zvolil jsem si vložení do komponenty Drive, především kvůli většímu výběru cyklů výpočtu. Po úspěšném vložení je DCC Chart přiřazen ke komponentě.

4.5.2 Propojování DCB

Při tvorbě řídicích struktur rozlišujeme následující druhy propojení:

- Propojení mezi bloky (nepublikované)
- Propojení bloku a parametru reálného pohonu
- Propojení mezi bloky, které má být publikováno do expert listu.
- Propojení vlastního chartu a bloku

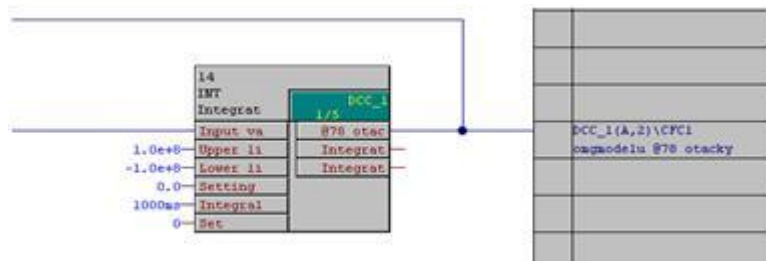
Druh propojení se nastavuje pomocí speciálních parametrů s pevně danou strukturou. Každý z parametrů musí být v unikátní, to znamená, nesmí dojít k jejich duplicitě. Pokud bychom pravidlo nedodrželi, budeme nato upozorněni při kompilaci.

Nyní si uvedeme několik příkladů vytvoření různých druhů propojení.

Propojení mezi bloky (nepublikované) – Jde o nejpoužívanější a nejběžnější způsob propojení, proto není potřeba přidávat další parametry.

Propojení mezi bloky publikované – Chceme-li sledovat hodnotu vstupu anebo výstupu bloku, musíme v řádku comment uvést text z následující struktury: @číslo. Tímto se vstup nebo výstup zobrazí v expert listu. Pro lepší přehlednost a snadnější orientaci můžeme tento vstup nebo výstup pojmenovat. Výsledný text v by vypadal např. takto: @číslo_jméno proměnné.

Propojení výstupu bloku a vstupu parametru reálného pohonu – Jestliže chceme, aby námi vytvořené struktury mohly ovlivnit reálný systém, musíme je propojit s parametry reálného pohonu. Příklad takového propojení je uveden na Obr. 4.2. Jak je patrné z obrázku k propojení je nutné do komentáře připojovaného bloku napsat text s následující strukturou @*číslo tedy např. @*1. Příklad propojení je ukázán na obr. 4.6.



Obr. 4.6: Detail různých propojení jednoho bloku

Protože výsledné struktury jsou mnohdy velice složité, máme možnost sledovat cestu signálu jednoduchým klikem pravým tlačítkem myši na spoj a zvolit položku Track signal.

4.5.3 Určení pořadí výpočtů bloků

Pokud vytvořená struktura nereaguje podle očekávání, jednou z možných příčin může být nesprávné pořadí, ve kterém jsou vloženy bloky vypočítávány. Pořadí výpočtu bloků lze určit ručně, nebo automaticky.

Contents of 'DCC_1\DCC_1'	Type	Pos	In
DCC_1\Nasobenimatic\24		1 / 1	
DCC_1\11	MUL	1 / 2	
DCC_1\13	ADD	1 / 3	
DCC_1\12	DIV	1 / 4	
DCC_1\14	INT	1 / 5	
DCC_1\1	MUL	1 / 6	
DCC_1\6	MUL	1 / 7	
DCC_1\CF1\1	NSW	1 / 8	
DCC_1\CF1\2	NOP1_B	1 / 9	
DCC_1\CF1\3	MUL	1 / 10	
DCC_1\4	MUL	1 / 11	
DCC_1\15	MUL	1 / 12	
DCC_1\5	ADD	1 / 13	
DCC_1\2	DIV	1 / 14	
DCC_1\3	INT	1 / 15	
DCC_1\Nasobenimatic\deltaa21	MUL	1 / 16	
DCC_1\Nasobenimatic\9	MUL	1 / 17	
DCC_1\mujSystem\11	MUL	1 / 18	
DCC_1\mujSystem\13	ADD	1 / 19	
DCC_1\mujSystem\12	DIV	1 / 20	
DCC_1\mujSystem\14	INT	1 / 21	
DCC_1\Nasobenimatic\26	MUL	1 / 22	
DCC_1\Nasobenimatic\2	ADD	1 / 23	
DCC_1\Nasobenimatic\3	MUL	1 / 24	
DCC_1\Nasobenimatic\5	MUL	1 / 25	
DCC_1\Nasobenimatic\11	MUL	1 / 26	
DCC_1\Nasobenimatic\13	NSW	1 / 27	
DCC_1\Nasobenimatic\27	MUL	1 / 28	
DCC_1\Nasobenimatic\28	AND	1 / 29	
DCC_1\Nasobenimatic\4	AND	1 / 30	
DCC_1\Nasobenimatic\29	DIV	1 / 31	

Obr. 4.7: Pořadí výpočtu jednotlivých bloků

Pořadí výpočtu jednotlivých bloků můžeme upravit ručně, nebo pomocí volby *optimize group task*.

4.5.4 Vytvoření vlastního chartu

Celková velikost námi vytvořených struktur je omezena pouze velikostí paměti, která slouží pro ukládání a faktem, že jeden DCC chart má k dispozici osm listů, na kterých lze bloky umístit. Protože osm listů by u složitějšího řízení nemuselo stačit, má každý lis ještě sedm podúrovní to znamená, že můžeme do chartu vložit další úroveň bloků. Celkem tedy můžeme mít chart až se sedmi úrovněmi.

Aby bylo možné používat vnoření bloků, musíme si vytvořit nový vlastní chart. To provedeme následujícím způsobem: Klikneme pravým tlačítkem na prázdnou plochu

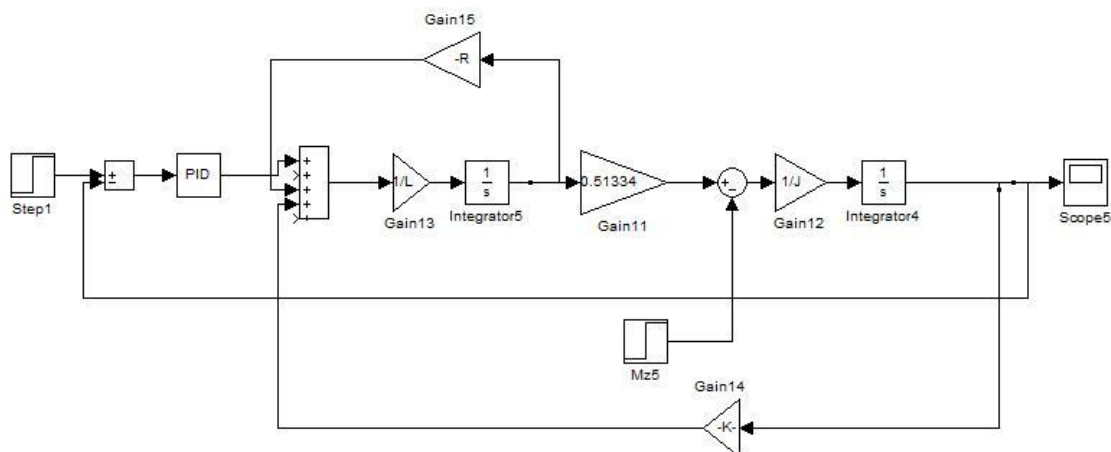
listu a zvolíme *insert new chart*. Aby bylo možné nově vytvořený blok vyžít, musíme mu přidat vstupy a výstupy.

4.5.5 Nahrání DCC Chartu do pohonu

Poté co máme hotovou vlastní řídicí strukturu, ji musíme nahrát do pohonu, jinak se námi vytvořené struktury neprojeví. Ještě před samotným nahráním je dobré námi vytvořený chart zkompilevat (ikona compile). Po dokončení kompilace se zobrazí okno s počtem chyb a varování viz x. Aby bylo možné chart nahrát do pohonu, nesmí námi vytvořená struktura v DCC obsahovat žádnou chybu (error). Poté přejdeme z DCC editoru do Simatic Scoutu a dáme volbu *download to system*. Nesmíme zapomenout, že chceme-li stahovat struktury do pohonu, musíme se nacházet v režimu online. Kvůli bezpečnosti není možné nahrávat struktury do pohonu, který je právě používán.

5. Aplikace vybraných referenčních struktur

Protože knihovna DCB obsahuje především základní prvky (násobení, sčítání integrace atd.), musíme dříve uvedené struktury rozložit na základní stavební prvky. Upravený referenční model je na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Upravený referenční model

Pro zjednodušení byla z referenčního modelu odstraněna proudová regulace. Výslednou strukturu referenčního modelu v DCC nalezneme v příloze. Regulátor otáčkové smyčky byl nastaven na hodnoty: $P = 2$, $Ti = 0,008$.

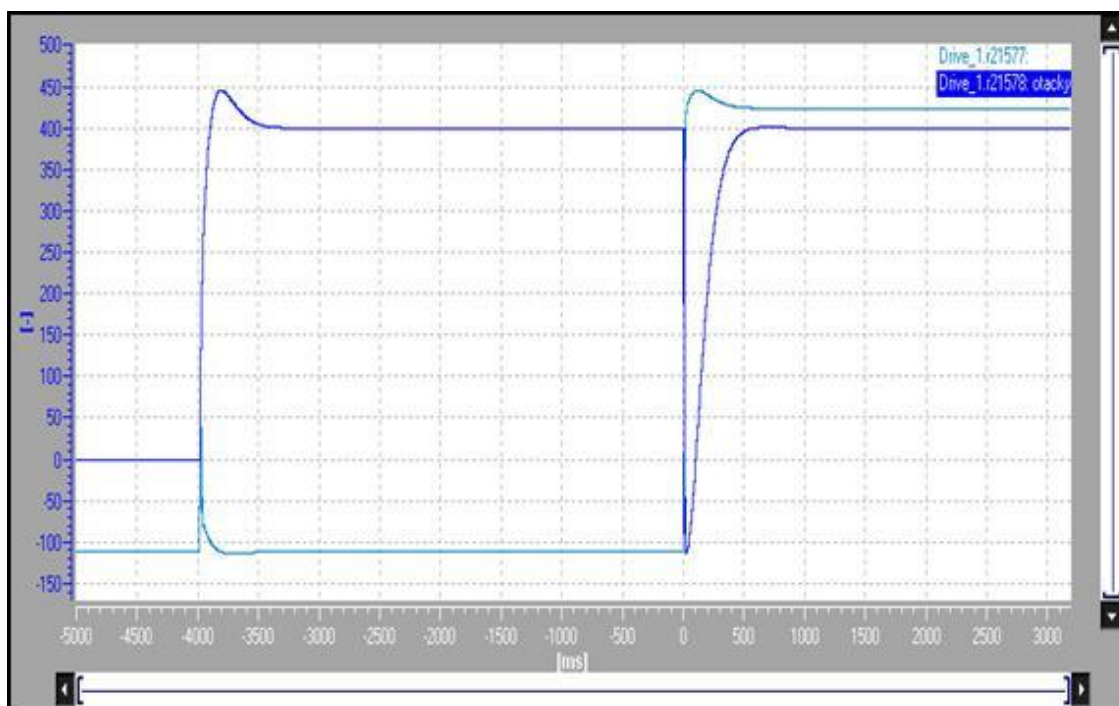
Model regulovaného systému bude narazen reálným pohonem Simatic S120. Kaskádní regulaci zde nebudu podrobněji rozebírat, protože ta je již v pohonu obsažena. Kvůli lepším výsledkům regulace bylo nastavení kaskádní regulace mírně upraveno, provedené změny a důvody které k nim vedly, budou popsány později.

5.1 Model SMCB

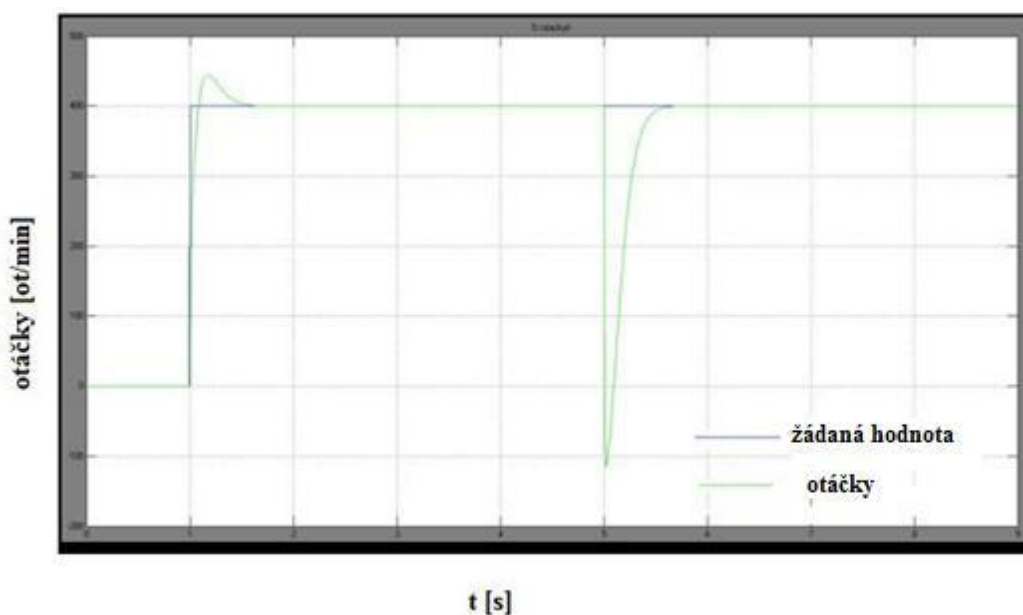
Nejdříve byl v DCC editoru vytvořen model představující SMCB, který je totožný s modelem SMCB v Matlabu. Struktura modelu je kvůli své rozsáhlosti vložena v příloze. Jak je vidět s přiložených schémat model se skládá pouze ze základních bloků, jako je sčítání, násobení a integrace. Přestože editor obsahuje blok pro PI regulátor, byl PI regulátor sestaven pouze ze základních bloků. Žádaná hodnota otáček se zadává v expert listu parametr p21560. Výsledný proud je zobrazen v parametru r21577. Hodnota otáček je uložena v parametru r21578.

Otáčkový regulátor byl nastaven následovně: $P = 0,1$, $Ti = 1$ a proudový regulátor měl následující nastavení: $P = 2$ a $Ti = 0,008$. Motor byl na začátku zastaven a měl nulové otáčky, v čase $t=1s$ byly otáčky nastaveny na hodnotu 400, Po ustálení byla v čase $t = 5s$ přivedena do systému chyba v podobě zátěžného momentu $M_z = -5 \text{ Nm}$. Průběh výsledných otáček je na obr. 5.2.

Pro srovnání je na obrázku uveden průběh simulací v Matlabu.



Obr. 5.2: Průběh otáček v Simaticu

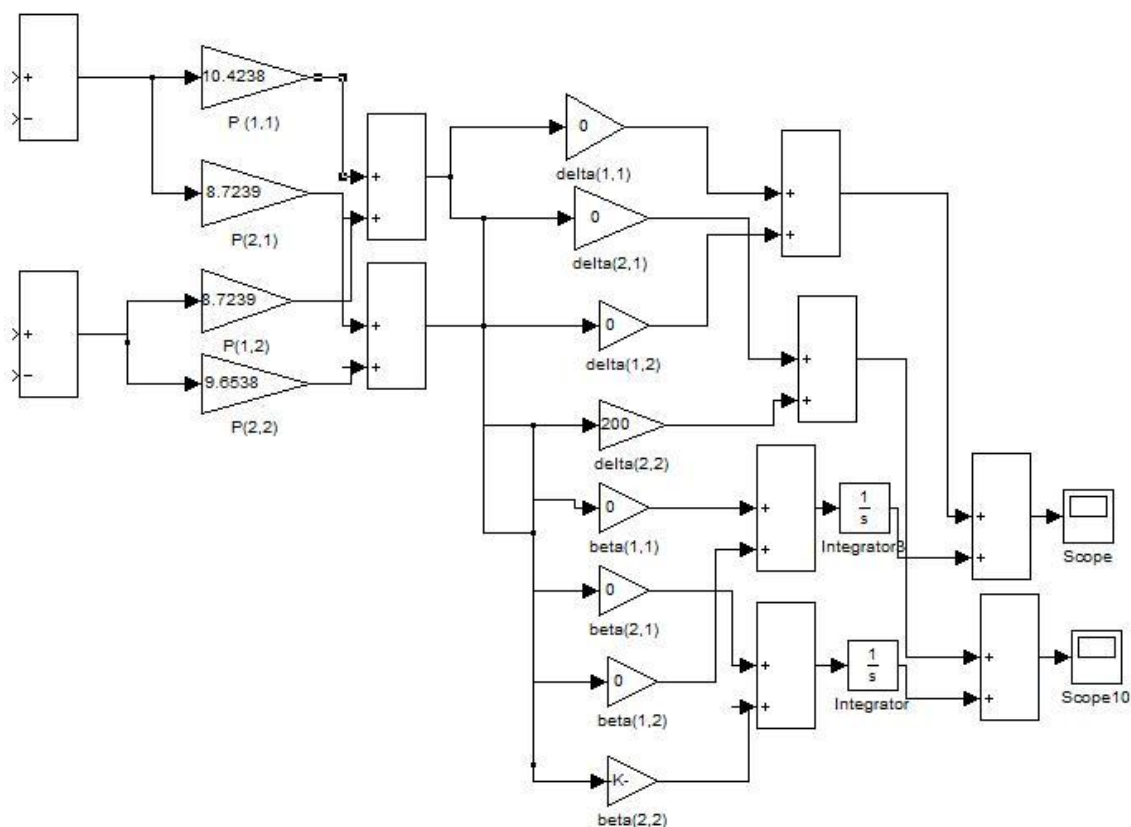


Obr. 5.3: Průběh otáček v Matlabu

Jak je patrné z výše uvedených průběhů otáček. Je průběh simulace pomocí programu Matlab velmi podobný s průběhem simulace v DCC. Tento výsledek potvrzuje, že struktura SMCB v editoru DCC je vytvořena správně.

5.2 Upravený Ljapunovův regulátor

Aby bylo možné použít regulační strukturu s referenčním modelem podle II. Ljapunovovy metody, bylo zapotřebí sestavit Ljapunovův regulátor, jehož schéma je uvedeno na obr. 3.2, protože však nemáme k dispozici bloky, které by umožňovaly tvorbu matic anebo jejich násobení, musel být regulátor rozložen na základní prvky a násobení matic muselo být upraveno. Blokové schéma v matlabu je na obr. 5.4. Blokové schéma DCC uvedeno v příloze. Pomocí simulace bylo ověřeno, že struktura v Matlabu a DCC editoru jsou svým výsledkem ekvivalentní. Implementace do pohonu je tedy pořádku.



Obr. 5.4: Upravený Ljapunovův regulátor

Pro Ljapunovův regulátor byl vytvořen speciální Chart, jeho úplná struktura je uvedena v příloze. Správnost této struktury byla ověřena pomocí simulací v Matlabu.

Matice **A** má následující tvar:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -5 \frac{R}{L} & -5 \frac{K_e}{L} \\ \frac{K_m}{J} & 0 \end{bmatrix}$$

Hodnoty matic β a δ byly hledány experimentálně. Pomocí mnoha simulací byly nalezeny optimální hodnoty těchto matic.

Výsledné konstanty Ljapunovova regulátoru byly nastaveny takto:

$$\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3000 \end{bmatrix} \quad \delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 2000 & 0 \\ 0 & 500 \end{bmatrix}$$

Výsledná matice **P** je vypočtena z rovnice 3.4,

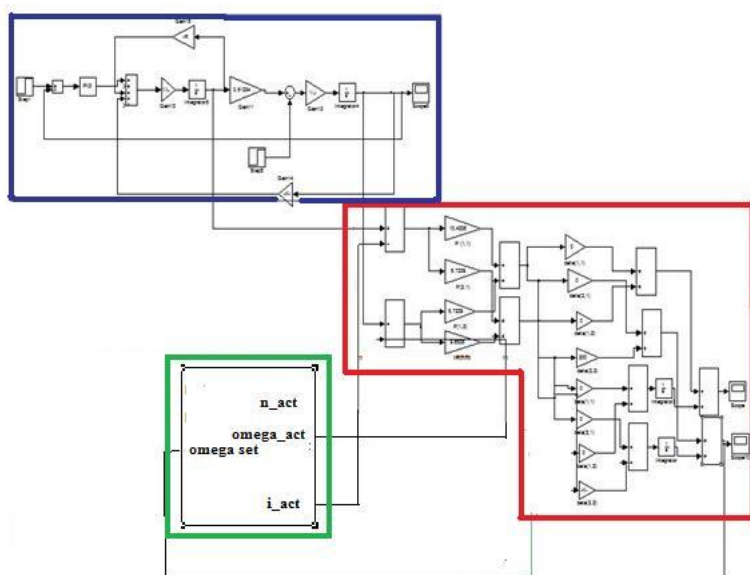
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 27,497 & 10,106 \\ 10,106 & 4,316 \end{bmatrix}$$

Jak již bylo řečeno členy matic β a δ by měly být voleny co možná největší. Nejvyšší možná hodnota členu matice β byla určena na 3000 a matice δ na 100, po překročení těchto hodnot se pohon rozkmitá.

5.3 Regulační struktura s referenčním modelem podle Ljapunova

Výsledná regulační struktura s referenčním modelem je složena z následujících částí:

- Referenční model (RM)
- Ljapunovův regulátor
- Model systému (reálný pohon)



Obr. 5.5: Regulační struktura s referenčním modelem podle Ljapunovova

Na obr. 5.5 je blokové simulační schéma v Matlabu v modrém obdélníku RM a v zeleném obdélníku model systému, červeně je pak označen regulátor dle Ljapunovova. Jak bylo již naznačeno dříve požadovaná hodnota otáček je zde nastavována následujícím způsobem.

Nejdříve se porovnají otáčky a proud RM a modelu systému (reálný pohon). Jejich rozdíl poté vstupuje do Ljapunovova regulátoru. A zde se vezme vektor rychlosti, který slouží k nastavení požadovaných otáček.

Na následujícím obrázku je zobrazena konečná řídicí struktura v DCC Chartu. Jak je vidět z přiloženého obrázku struktura řízení je podobná blokovému schématu z Matlabu, ale došlo k mírnému zjednodušení, protože model systému byl nahrazen reálným pohonem.

5.4 Měření na reálném pohonu

Pro měření otáček motoru je důležité si správně zvolit parametry - signály, které budeme sledovat a následně pomocí funkce *Trace* zaznamenávat jejich časový průběh. Jak bylo uvedeno již dříve, k ukládání naměřených průběhů máme k dispozici jen omezenou velikost paměti, proto není vhodné měřit více než pět parametrů (signálů) najednou. Jednou z velmi užitečných vlastností měření je možnost snadného vložení

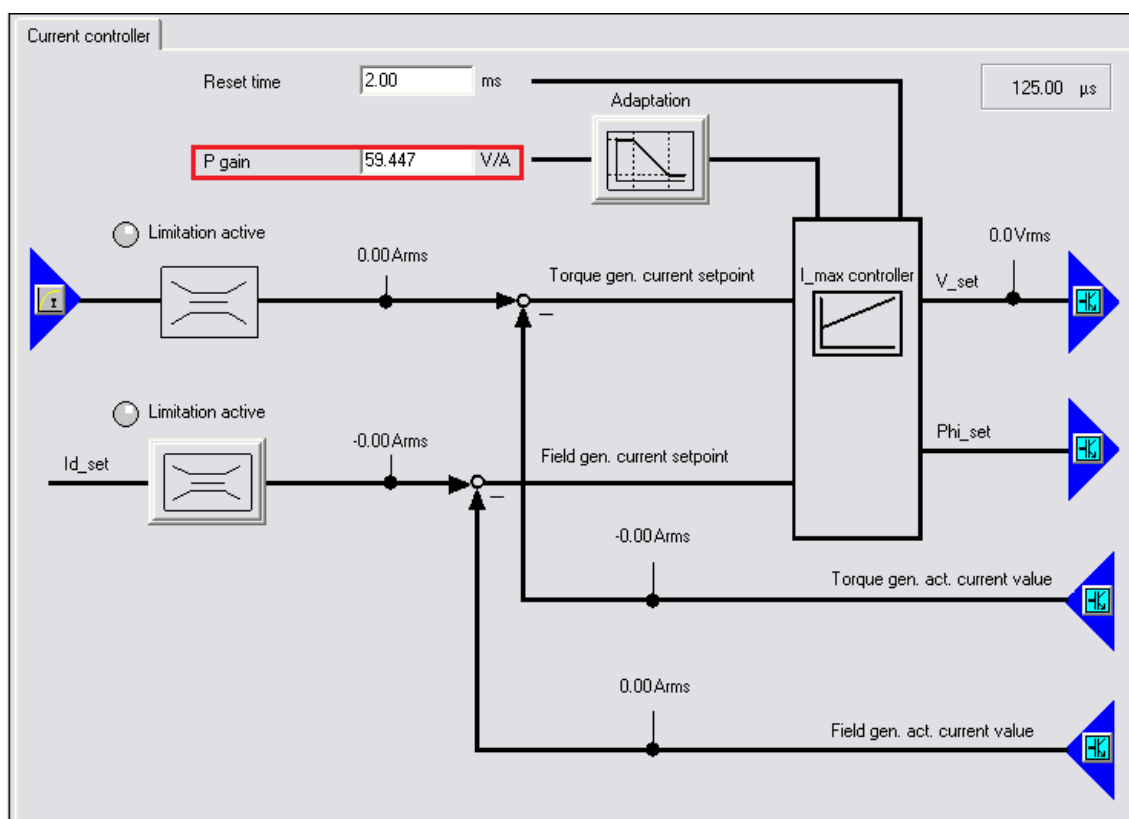
více měření do jediného grafu. Po zapnutí pohonu musíme parametr p21507 a 21568 změnit na 0, aby bylo možné měnit otáčky.

Při použití vlastní regulační struktury s referenčním modelem podle Ljapunova viz příloha, se otáčky reálného pohonu neustálily na konstantní hodnotě, ale docházelo ke kmitům.

Aby došlo k potlačení těchto kmitů, bylo potřeba upravit vnitřní řídicí strukturu motoru. V Komponentě Drive část Setpoint channel, aktivovat Bypass ramp-function generato

5.5 Omezení reálného pohonu

Na rozdíl od simulačních modelů se ukázalo, že nemůžeme výrazněji zasáhnout do proudové regulační smyčky reálného systému. Vnitřní nastavení proudového regulátoru je zobrazeno na obr. 5.6. Pro úplnost uvádím i obrázek s nastavením otáčkové regulace systému.

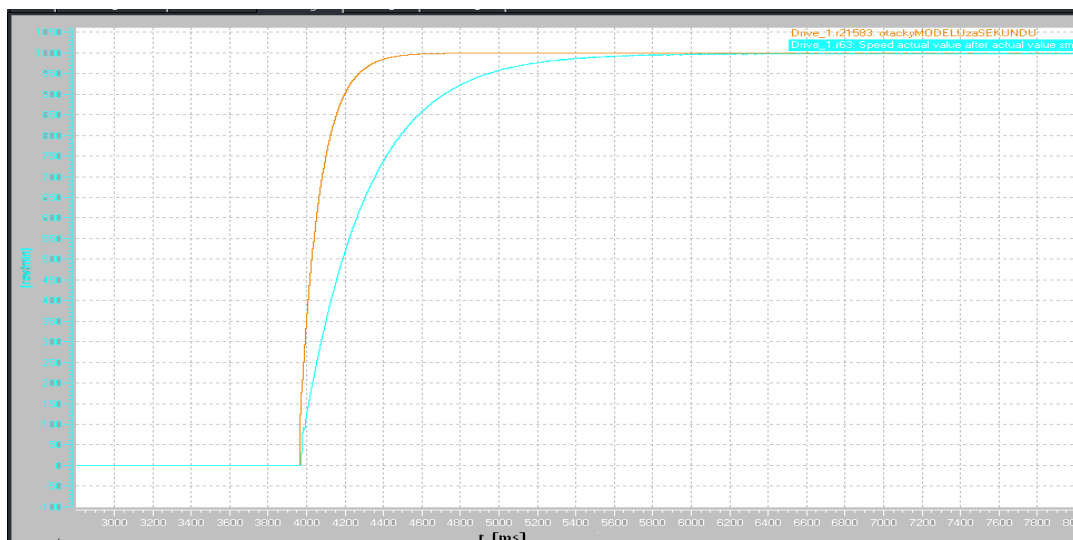


Obr. 5.6: Interní proudová regulace

Hodnota zesílení proudové regulace je vyznačena červeným rámečkem. Ale narozdíl od simulačních modelů, zde nemůžeme použít jakoukoliv námi požadovanou

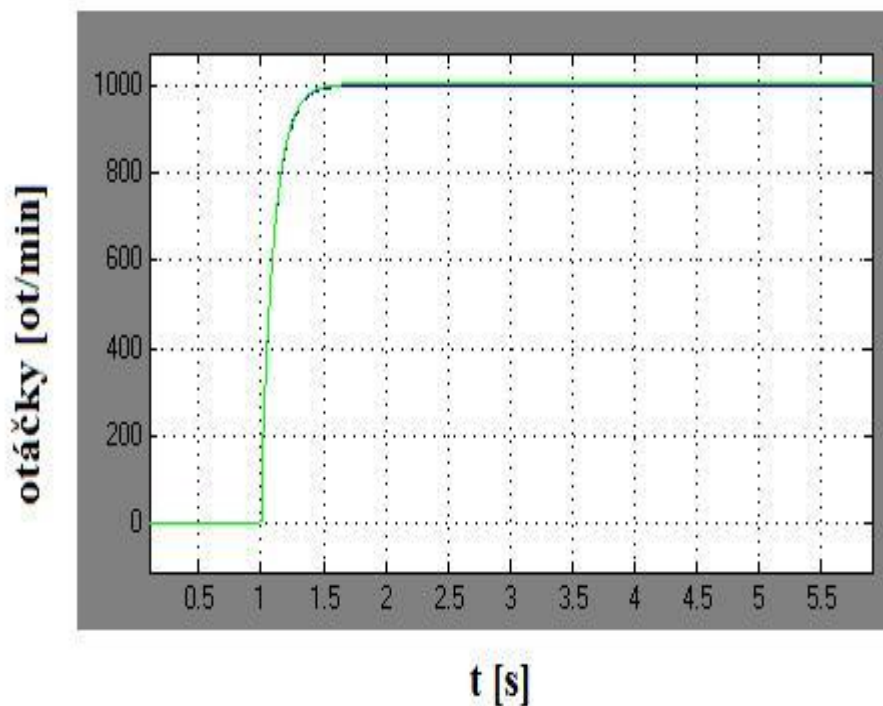
hodnotu, ale jsme limitováni konstrukčními omezeními (použité komponenty, maximální proud atd.).

Jak bylo již několikrát uvedeno, kvalita regulace podle Ljapunovova závisí na hodnotách prvků matic β a δ . Pro co nejlepší regulaci by jejich hodnota měla být co možná největší. Kvůli omezením použitého pohonu bylo možné použít maximální hodnotu $\beta_{22} = 3000$. Maximální hodnota otáček použitého pohonu je 5600 ot/min.



Obr. 5.7: Průběh otáček pohonu a referenčního modelu

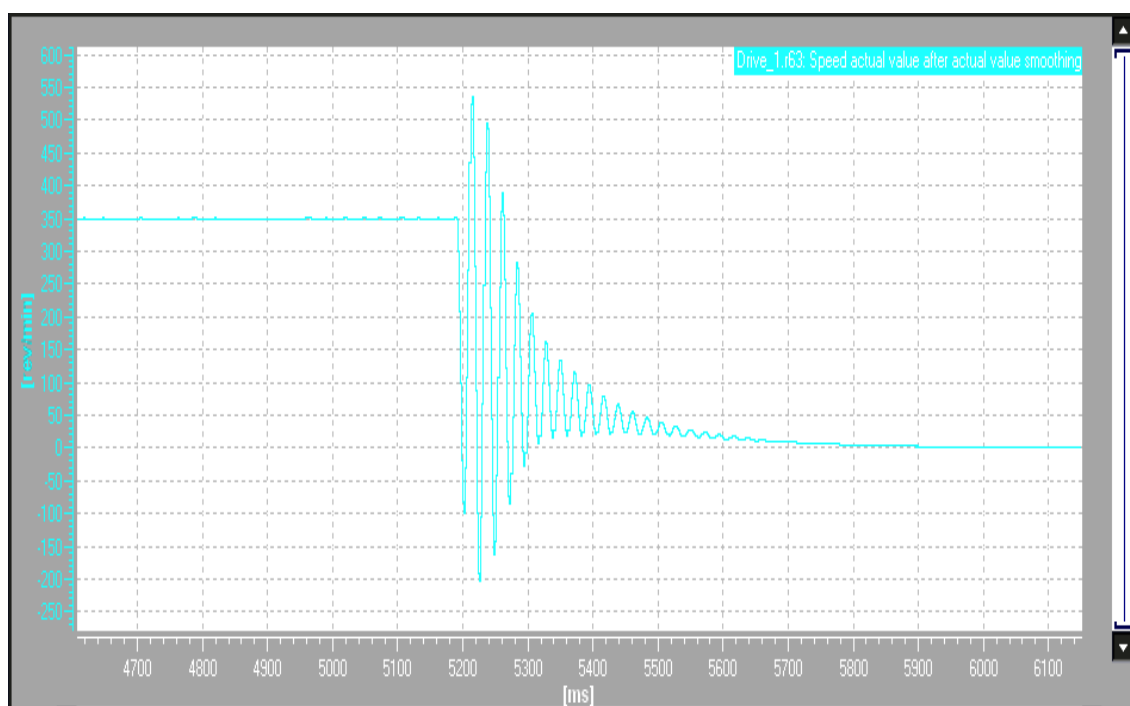
Jak můžeme vidět na obr. 5.7, při použití první řídicí struktury se otáčky skutečného pohonu (červená) se ustalují pomaleji než otáčky RM modrá.



Obr. 5.8: Průběh otáček v Matlabu při použití RM podle Ljapunovova

Jak je patrné z výše uvedeného obrázku je průběh otáček RM a systému shodný.

Po vyzkoušení a naměření výsledků. Byla provedena úprava referenčního modelu a matice P.



Obr. 5.9: Skutečný průběh otáček při použití upraveného regulační struktury

Na obr. 5.9 je zobrazen průběh otáček reálného pohonu. Při použití druhé varianty řídicí struktury. Na začátku měření je motor ustálen na 350 otáčkách. Přibližně v čase $t = 5,2s$ je dán požadavek na změnu otáček na 0 (zastavení motoru). Čas do úplného zastavení motoru je asi 1560ms.

6. Závěr

Úkolem práce bylo aplikovat struktury s referenčním modelem pro řízení elektrických pohonů na reálný pohon Siemens Simatic S120 s motorem typu 1FT6, jde o synchronní motor s permanentními magnety. Soustředím se zde na dva motory. Prvním motorem, který byl vybrán především pro svou jednoduchost, byl stejnosměrný motor s cizím buzením.

Struktura modelu výše zmíněného motoru byla využita při tvorbě referenčního modelu. Druhým model, který se zde objevuje, je SMPM. Ten byl vybrán, protože jak již bylo zmíněno, právě tento typ motoru se nachází v laboratoři.

Úvod obsahuje matematický popis a modely těchto strojů. K popsání synchronního stroje jsem použil DQ model.

Další kapitola se zabývá klasickým kaskádním řízením uvedených motorů. Zde se nejdříve seřizuje smyčka podřízená, tedy proudová a následně po ní smyčka nadřazená otáčková.

Nalezneme zde i různé metody a kritéria, která se používají pro řízení pohonů. Následně se můžeme seznámit se řízením pomocí referenčních struktur. Tato bakalářská práce se soustředí na regulační struktury s referenčním modelem, které vycházejí z II. Ljapunovovy věty. Tato metoda byla vybrána, protože je vhodná pro aplikaci na elektrické pohony. Aplikace vybraných regulačních struktur byla provedena pomocí DCC editoru. Kvůli omezením tohoto programovacího nástroje museli být některé části regulační struktury upraveny. Po vytvoření a následné aplikaci vybraných regulačních struktur s referenčním modelem podle Ljapunovova bylo nutné, kvůli nežádoucím kmitům zasáhnout do interních regulačních struktur pohonu. Motor byl typu 1FT6. Naměřený průběh otáček po aplikaci regulačních struktur není ideální. Jedním z důvodů je nemožnost výrazněji zasáhnout do proudové smyčky pohonu. Dalším z důvodů je zjednodušení referenčního modelu, především odstranění proudové regulační smyčky. Je potřeba též zdůraznit, že aplikována byla pouze nejjednodušší regulační struktura s referenčním modelem podle Ljapunovova, tedy varianta bez kompenzace. Lepších výsledků by bylo možné dosáhnout přidáním proudové regulační smyčky do RM a použití rozšířených variant regulačních struktur s referenčním modelem (kompenzace v modelu, kompenzace v systému) více v [1].

A právě výše uvedené změny, které by vylepšily regulaci pohonu, mohou být námětem pro další práci.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1: Stejnosměrný motor s cizím buzením</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.2: Blokové schéma stejnosměrného cize buzeného motoru s konstantním buzením.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1.3: Náhradní elektrické schéma SMPM</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1.4: Blokové schéma SMPM</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.1: Blokové schéma proudové smyčky</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2.2: Celková regulační struktura stejnosměrného motoru s cizím buzením ..</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2.3: Průběh otáček SMCB na skok žádané hodnoty otáček a chyby v podobě 5 Nm.</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2.4: Průběh proudu SMCB při řízení otáček</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2.5: Klasické řídicí schéma SMPM.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2.6: Průběh otáček při simulaci v Matlabu</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.1: Parametrické a signální adaptativní systémy</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.2: Stabilní regulační struktura s referenčním modelem</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.1: Možné propojení komponent pohonu.</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4.2: Komponenty pohonu, na kterém byly vyzkoušeny regulační struktury s RM podle Ljapunova.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4.3: Expert lits pro nastavení a prohlížení parametrů (signálů).</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4.4: Nástroj na měření průběhů signálů</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.5: Ukázka tvorby vlastní regulační struktury.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4.6: Detail různých propojení jednoho bloku</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.7: Pořadí výpočtu jednotlivých bloků</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5.1: Upravený referenční model</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5.2: Průběh otáček v Simaticu</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5.3: Průběh otáček v Matlabu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5.4: Upravený Ljapunovův regulátor</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5.5: Regulační struktura s referenčním modelem podle Ljapunovova</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 5.6: Interní proudová regulace</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5.7: Průběh otáček pohonu a referenčního modelu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5.8: Průběh otáček v Matlabu při použití RM podle Ljapunovova.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5.9: Skutečný průběh otáček při použití upraveného regulační struktury</i>	<i>47</i>

Použitá literatura

- [1]. Ptáček M., *Použití regulačních struktur s referenčním modelem pro regulaci elektrických pohonů. Diplomová práce.* Liberec : FM TUL, 2010.
- [2]. Rydlo P., *Řízení elektrických střídavých pohonů. Skriptum.* Liberec : FM TUL, 2007. ISBN 978-80-7372-223-4.
- [3]. Pavelka J., Čeřovský Z., Javůrek J., *Elektrické pohony.* Scriptum. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02314--1.
- [4]. Šulc B a Vítěčková, M. *Teorie a praxe návrhu regulčních obvodů.* 1. vydání. Praha : ČVUT, 2004. str. 333. ISBN 80-01-03007-5.
- [5]. Siemens AG. *Sinamics S120 Installation and Start up Manual.* 2008.
- [6]. Fedor P a Perduková D. *Použitie II. Ljapunovovej metódy v regulovaných elektrických pohonoch.* Košice : autor neznámý, 1997. ISBN 80-967 636-3-6.
- [7]. Fedor P., *Zapojenie pre adaptivnu reguláciu s referenčným modelom.* udělené AO č. 24811 v r.1986.
- [8]. Siemens A.G. *Sinamics/Simotion Description of the DCC Standard Blocks.* 2009.
- [9]. Siemens A.G *SINAMICS/SIMOTION DCC editor.* 2007.
- [10]. Diblík M., *Elektrické pohony pro dynamicky náročné aplikace.* Disertační práce. Liberec : TUL , 2006.

Obsah přiloženého CD

Matlab RM podle Ljapunova

Matlab SMCB

Matlab SMPM

Regulační struktury reálného pohonu

Bakalářská práce ve formátu pdf

Přílohy

A Parametry DC motoru uvedené v [1].

Typ:

Výrobce: Siemens

Štítkové údaje

jmenovité otáčky:	$n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$
rozsah otáček:	$n_{roz} = 10\text{-}1040 \text{ ot.min}^{-1}$, (max. 1200 ot.min^{-1})
jmenovitý výkon:	$P = 1,72 \text{ kW}$
napětí kotvy:	$U_q = 110\text{-}420 \text{ V}$
proud kotvy:	$I_q = 5,80\text{-}5,90 \text{ A}$
proud budicího vinutí	$I_f = 1,00 \text{ A}$ při 220 V $I_f = 0,68 \text{ A}$ při 140 V

Naměřené parametry motoru (převzaté z [6])

odpor vinutí kotvy:	$R_a = 13,9 \Omega$
indukčnost vinutí kotvy:	$L_a = 85 \text{ mH}$
odpor budicího vinutí:	$R_b = 159,9 \Omega$
indukčnost budicího vinutí:	$L_b = 150 \text{ mH}$
konstanta buzení:	$\xi = c_{ss} \times \Phi_i = 2,92 \text{ Vs}$
moment setrvačnosti:	$J = 0,021 \text{ kg.m}^2$

B Parametry SMPM

Typ: 1FT6

Mezní hodnoty

max. rychlost: $n_{max} = 4800 \text{ ot.min}^{-1}$

max. moment: $M_{max} = 24 \text{ Nm}$

špičkový proud: $I_{max} = 22 \text{ A}$

Hodnoty naměřené na motoru

Jmenovité napětí: 315 Vrms

Jmenovitý proud motoru: 3.40 A

Jmenovitá rychlost: 3000 Ot/min

Počet pólů: 3

Momentová konstanta: 1.48 Nm/A

Maximální otáčky motoru: 9100.0 rev/min

Maximum motor current 22.00 A motor power 1.48 kW

Jmenovité motoru 4.70 Nm

Napěťová konstanta motoru: 94.0 Vrms

Proud motoru v klidu : 4.10 Arms

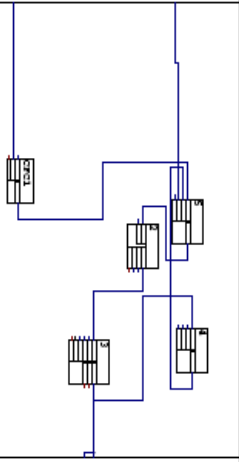
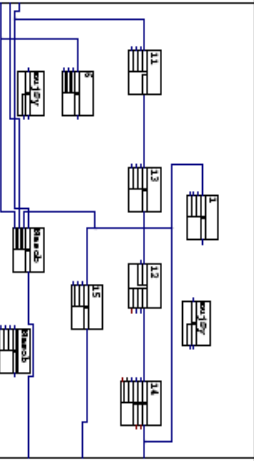
Limitní proud motoru: 10.10 Arms

Moment setrvačnosti: 0.000850 kgm²

odpor vinutí statoru : $R = 2,6 \Omega$

D Regulační struktury s referenčním modelem

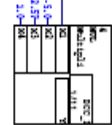
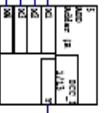
Regulační struktura s RM

SIMATIC		S7_CU320_maxia\CPU 313C-2DP\DP master system\...\IDCC_1		05/18/2011 08:56:41 PM	
The reproduction, transmission or use of this document or its contents is not permitted without express written authority. Offenders will be liable for damages. All rights, including rights created by patent grant or registration of a utility model or design, reserved.					
S7_CU320_maxia\CPU 313C-2DP\DP master system\SIMATIC_S120_CU320\SIMATIC_S120_CU320\Charte\IDCC_1		Author: Pavel Kachbort		Created on: 4.2.2011 10:36	
Partit.: 1 Overview		Last change: 18.5.2011 20:55		Number of pages: 4	

The reproduction, transmission or use of this document or its contents is not permitted without express written authority. Offenders will be liable for damages. All rights, including rights created by patent grant or registration of a utility model or design, reserved.

S7_CU320_naxis
T Address

0.0
S7_CU320_naxis
T Address

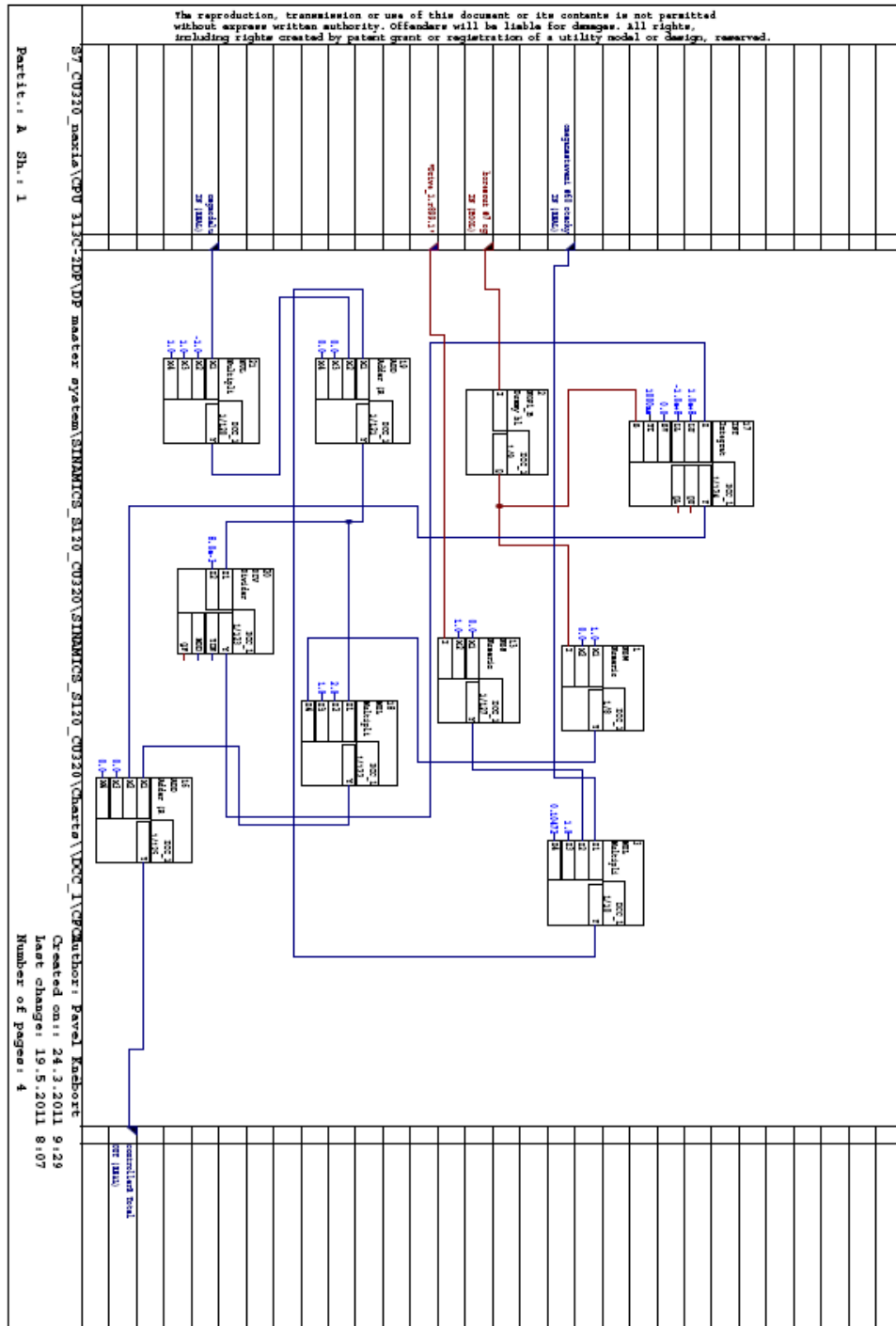


S7_CU320_naxis
T Address

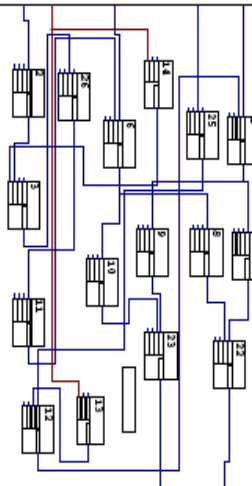
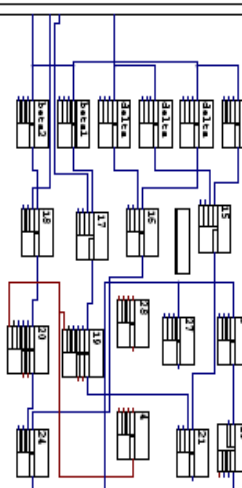
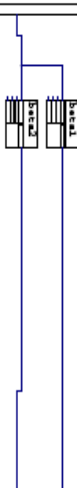
S7_CU320_naxis\CPU 313C-2DP\DP master system\SIMATIC_S130_CU320\SIMATIC_S130_CU320\Charts\DOC_1
Partit.: A Sh.: 1
Author: Pavel Kneibort
Created on: 4.2.2011 10:36
Last change: 18.5.2011 20:55
Number of pages: 4



Blok otáčkového regulátoru



Blok Ljapunovova regulátoru

The reproduction, transmission or use of this document or its contents is not permitted without express written authority. Offenders will be liable for damages. All rights, including rights created by patent grant or registration of a utility model or design, reserved.					
					
					
SV_C0320_moxia\CPU 313C-IDP\DP master system\SHIMMICS_S130_C0320\SHIMMICS_S130_C0320\charts\DCU_1\MeasAbbsmsBavel_Knobort					
Created on: 3.3.2011 11:26					
Last change: 18.5.2011 20:58					
Number of pages: 6					

The reproduction, transmission or use of this document or its contents is not permitted without express written authority. Offenders will be liable for damages. All rights, including rights created by patent grant or registration of a utility model or design, reserved.

S:\CU320_nokia\CPU_313C-2DP\DP master system\BINARIES_M10_CU320\BINARIES_M10_CU320\Charts\DOC_1\KashibhamaGeneral_Kashibort
 Partit.: A SH.: 1
 Created on: 3.3.2011 11:26
 Last change: 18.5.2011 20:58
 Number of pages: 6

